VISIT…

Проф. Е. Л. БРАВИН, проф. Е. Б. ЛУНЦ,
доц. М. В. ГУРЕВИЧ и инж. М. С. ДУБНЕР

СТРЕЛКОВО-ПУШЕЧНОЕ ВООРУЖЕНИЕ САМОЛЕТОВ

ОСНОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

Под общей редакцией
проф. Е. Л. БРАВИНА

Военное Издательство
Народного Комиссариата Обороны Союза ССР
Москва — 1941

Проф. Е. Л. Бравин, проф. Е. Б. Лунц, доц. М. В. Гуревич и инж. М. С. Дубнер. **Стрелково-пушечное вооружение самолетов.**

Книга является учебником для слушателей Военной воздушной ордена Ленина Академии ВВС Красной Армии имени Жуковского и может служить пособием для слушателей авиационных втузов и для инженеров при проектировании автоматического оружия.

В книге изложены специальные методы расчета автоматического оружия, преимущественно для самолетных установок.

Главное внимание обращено на расчеты движения частей автоматики. Вопросы прочности подробно не рассматриваются, кроме особенностей расчета снарядов и стволов.

Глава 1, § 22 главы III, § 26 и часть § 28 главы V (рассмотрение вопроса о влиянии на скорострельность момента включения в работу подающих органов), а также главы VI, VII и VIII написаны проф. Е. Л. Бравиным; введение, главы II и III (кроме § 22) — доц. М. В. Гуревичем; глава IV и § 25 главы V — проф. Е. Б. Лунцем; § 27 и 28 (кроме указанного выше вопроса), § 29 — 32 главы V — инж. М. С. Дубпером.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В данном учебнике пришлось отступить от некоторых обозначений, принятых в специальных дисциплинах и ведомственных стандартах, ввиду того, что курс „Стрелково-пушечное вооружение самолетов" опирается на ряд смежных дисциплин: внешняя балистика, внутренняя балистика, теория проектирования снарядов и стволов, общая теория лафетов и т. д., в которых для различных величин использованы одинаковые обозначения.

Так, во внешней балистике через v обозначается *абсолютная* скорость движения снаряда, а во внутренней балистике — *относительная* скорость. Эта условность не вызывает затруднений внутри одной какой-либо дисциплины, но для перехода от одних скоростей к другим необходимо выразить связь между ними формулой

$$v_r = \chi \cdot v_a.$$

При решении задачи пиродинамики удобно ввести греческую букву λ для обозначения „удельных" путей снаряда по отношению к телу орудия, т. е. путей, выраженных в долях приведенной длины зарядной каморы l_1:

$$\lambda = \frac{l}{l_1},$$

как это принято в таблицах АНИИ, изд. 1933 г.

Вследствие этого, во избежание путаницы понятий, пришлось видоизменить обозначения характеристик формы зерна добавлением штриха к основным обозначениям ($\varkappa'$, λ' вместо $\varkappa$, λ) принимая во внимание, что указанные величины связаны общей системой уравнений пиродинамики.

Введены обозначения:

p'_{med} — среднее давление пороховых газов в аргументе времени;

p''_{med} — среднее давление пороховых газов в аргументе пути, что позволяет установить четкое различие между средними величинами в упомянутом выше смысле.

Кроме того, приняты следующие обозначения:

S_0 — площадь поперечного сечения канала ствола с учетом нарезов, вместо s;

L — длина канала ствола, вместо $L_{кн}$;

L_0 — длина нарезной части канала, вместо $L_{нр}$;

W_1 — удельный объем пороховых газов, вместо w_1;

w_a — объем зарядной каморы, вместо W_0;

p_a — давление форсирования;

p_0 — дульное давление, вместо $p_д$;

v_0 — дульная скорость, вместо $v_д$;

l_0 — полный путь снаряда по отношению к телу орудия к моменту вылета, вместо $l_д$.

Таким образом, индекс a приписывается к значениям всех величин в момент форсирования, а индекс 0 — ко всем элементам у дульного среза.

ВВЕДЕНИЕ

На первой ступени развития ручного огнестрельного оружия основные его качества — дальность действия и пробивная способность — не могли дать значительных боевых преимуществ перед неогнестрельным оружием из-за очень малой скорострельности.

В то время метательное оружие — пики, луки, арбалеты, аркебузы — по изготовлению и боевому применению достигли своего совершенства, тогда как огнестрельное оружие из-за несовершенной техники находилось еще на очень низком уровне развития. Поэтому в течение еще большого промежутка времени — от появления огнестрельного оружия в начале XIV века до середины XVII века — вооружено им было только 10—50% пехоты; остальная часть пехоты (пикинеры, лучники) была вооружена неогнестрельным оружием.

Метательное неогнестрельное оружие сошло со сцены лишь в XVII веке, когда было вытеснено более усовершенствованным огнестрельным оружием с повышенной скорострельностью.

Необходимость увеличения скорострельности была ясна, и она проявлялась в стремлении не только повысить скорострельность обычных ружей, которыми была вооружена вся пехота, но и в создании специальных образцов, которые можно считать прототипами современного автоматического оружия. Такие специальные образцы оружия, их боевое применение и принципы работы дали богатый материал, который использован для создания современного автоматического оружия на новой технической основе.

Повышение скорострельности такого оружия шло по двум путям:

1) механическое соединение нескольких стволов, стрельбу из которых можно было вести последовательно, залпами из нескольких стволов или из всех стволов одновременно;

2) быстрая стрельба последовательными выстрелами из одного ствола с предварительным заряжанием его или магазина несколькими зарядами.

Первые образцы многоствольного скорострельного оружия, появившиеся в конце XV века, назывались „органы“ или „рибо-

декены“ (Западная Европа) и „сороки“ (Россия). Устройство и принцип действия их были, по существу, одинаковыми. Такая „сорока“ была применена при завоевании Сибири атаманом Ермаком Тимофеевичем (1583 г.).

Вначале „органы“ имели вид, изображенный на рис. 1. Несколько стволов было расположено горизонтально, в одну линию, на специальном лафете. Стрельба производилась в результате воспламенения специальной пороховой дорожки, идущей к затравочным отверстиям стволов. Перезаряжание отнимало очень много времени.

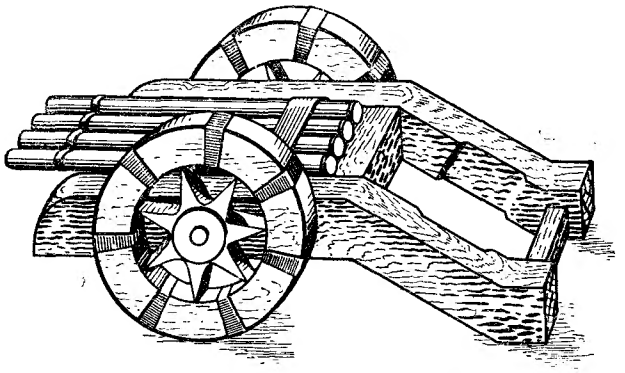


Рис. 1. Четырехствольный „орган“.

Для того чтобы увеличить число выстрелов, стволы стали располагать в несколько рядов, отчего „орган“ получил форму ящика. Такой „орган“, относящийся к 1644 г., изображен на рис. 2.

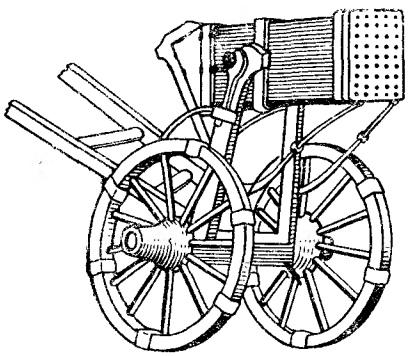


Рис. 2. Орган в виде ящика.

Вопрос об увеличении скорострельности при стрельбе из одного ствола впервые был решен в Дании в 1583 г. (эспиньоль). Стрельба из последовательно заряженного ствола производилась в результате воспламенения очередного заряда постепенно сгорающим шнуром. Заряжалось ружье с дула (рис. 3).

Уже в начале XVI века появились образцы ружей, у которых сзади ствола помещался вращающийся барабан с несколькими каморами (рис. 4). Для последовательной стрельбы заряженный барабан поворачивали и устанавливали очередной каморой против ствола. В положение для выстрела барабан фиксировался пружиной, заскакивавшей в углубление на нем.

Большая длительность заряжания, отсутствие надежной обтюрации (для оружия с барабаном), а также ряд производ-

ственно-технических затруднений не давали особых преимуществ в применении указанных образцов. Идеи создания скорострельного оружия, не нашедшие необходимой технической основы, были оставлены в XVII веке, и к ним вновь вернулись лишь в XIX веке на базе новой техники. Развитию скорострельного оружия препятствовало также и то, что стрельба картечью из артиллерийских орудий восполняла недостатки ручного оружия с малой скорострельностью.

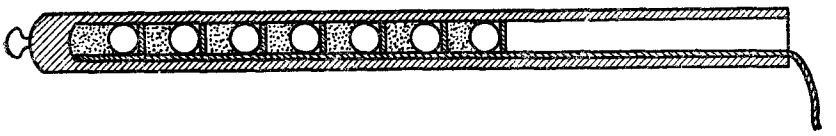


Рис. 3. Многозарядный ствол (эспиньоль).

Вторичное появление скорострельного оружия, по принципу устройства и действия сходного с „органами", относится к середине XIX века. Это оружие, названное картечницами или митральезами, было создано ввиду перевооружения пехоты нарезными ружьями, так как пехота, вооруженная нарезным оружием, сразу получила перевес в огне, умалив значение гладкоствольной полевой артиллерии и ее главного снаряда — картечи.

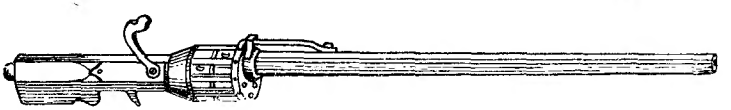


Рис. 4. Ствол с барабаном.

Войны середины XIX века показали, что стрелковая цепь, вооруженная нарезными ружьями, губительно действует против артиллерии, поражая на выбор прислугу и лошадей. Артиллерия не смогла уже безнаказанно стрелять на дальностях действительного картечного огня, так как наивыгоднейшее действие картечи было до 600 шагов, в то время как нарезные ружья имели убойную дальность до 1 000—1 200 шагов. Необходимо было оружие, способное заменить действие картечи, но за пределами дальности стрельбы из ружей пехоты.

Это и было достигнуто созданием скорострельных образцов оружия, которое придавалось артиллерийским частям и имело задачей заменить действие картечи. Поэтому оно получило не совсем правильное название „картечницы" [1]. В большинстве случаев картечницы были многоствольные, с неподвижными стволами, расположенными горизонтально, или с вращающимися относительно общей оси стволами, расположенными по кругу. Были и одноствольные картечницы.

---

[1] Во Франции такие системы назывались canons à balles — орудия, стреляющие пулями.

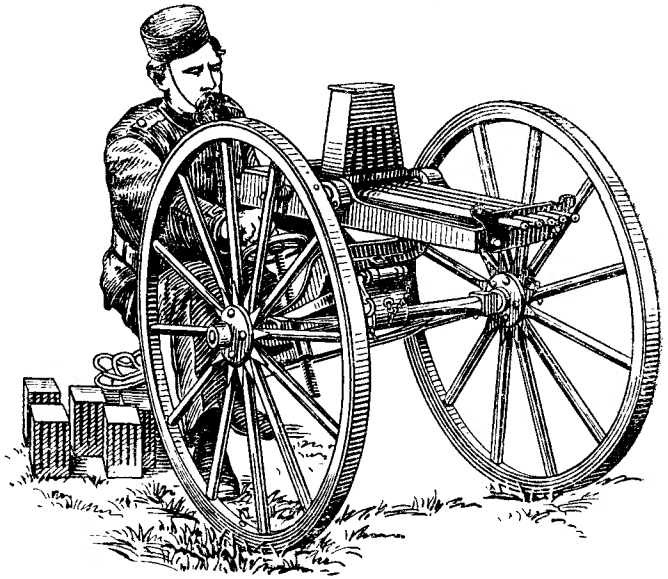


Рис. 5. Картечница Норденфельда.

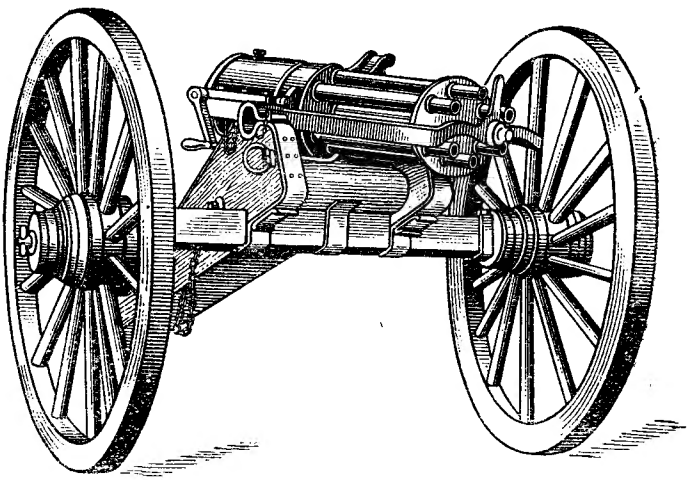


Рис. 6. Картечница Гатлинга.

В картечницах с неподвижными стволами очередной патрон для перезаряжания ствола подводился при помощи подвижных камор, принимавших патроны из специальных магазинов, или, как их называли, „сборок". В картечницах с вращающимися стволами каждый ствол по очереди подходил к системе неподвижных камор и устанавливался в положение для выстрела.

Принцип действия картечниц, как видно, отличен от принципа действия современного автоматического оружия, у которого механизмы перезаряжания и выстрела действуют за счет энергии пороховых газов.

На рис. 5 показана пятиствольная картечница системы Норденфельда на подвижном лафете, а на рис. 6 — шестиствольная кругового расположения картечница Гатлинга, принятая на вооружение в России в 1872 г.

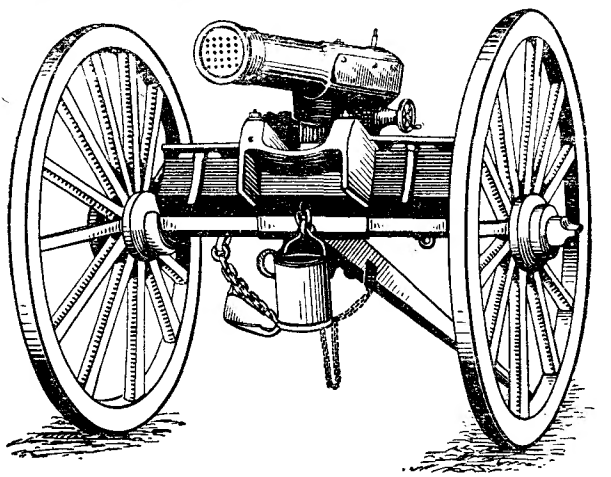


Рис. 7. Картечница Реффи.

Многорядное расположение стволов возродилось в картечнице Реффи (рис. 7), принятой во Франции и применявшейся во франко-прусской войне 1870—1871 гг.

Калибр картечницы был от 11—12 *мм* (калибры винтовок) до 25 *мм*. В большей степени распространены были картечницы под винтовочный патрон (наша картечница системы Гатлинга калибром 10,16 *мм*, т. е. 4,2 линии, под патрон Бердана). Стреляющий механизм приводился в действие вручную, вращением рукоятки.

На вооружении полевой артиллерии картечницы состояли недолгое время. В результате ряда дискуссий о целесообразности применения картечниц, а также опыта франко-прусской войны 1870—1871 гг. и специальных полигонных испытаний картечницы были сняты с вооружения полевой артиллерии и переданы в крепости. (В России картечницы Гатлинга были переданы в крепости в 1876 г.)

Для артиллерии опыт с картечницами важен по своим последствиям: он указал дальнейший путь и средства увеличения скорострельности полевых орудий. Однако вооружение армии картечницами затормозило развитие и распространение автоматического оружия — пулеметов.

Идея использования пороховых газов для перезаряжания и производства очередного выстрела, т. е. то, что составляет существо современного автоматического оружия, не могла быть осуществлена в то время из-за низкого уровня оружейной и общей техники. Когда проблема автоматического оружия была технически разрешена, появилось другое, не менее существенное препятствие — всеобщее недоверие и предубеждение авторитетных военных специалистов, основанное на неудаче с картечницами.

Впервые идея создания оружия, в котором развиваемое при выстреле давление пороховых газов используется, кроме выбрасывания пули, и для работы механизмов перезаряжания, была предложена знаменитым английским металлургом Г. Бессемером. В 1854 г. он получил патент на пушку, у которой затвор открывался автоматически давлением пороховых газов (патрон унитарный). В этой же пушке впервые было применено и водяное охлаждение ствола.

В период от получения Бессемером (1854 г.) первого патента на автоматическое оружие до патента Максима (1883 г.) было сделано много предложений, причем заложенные в них идеи в том или ином виде находят приложение и сейчас. Уже в то время было известно использование отдачи ствола, отвод пороховых газов, свободный затвор и другие принципы, на которых работает современное автоматическое оружие. Однако эти идеи опередили свое время. Они были осуществлены лишь в единичных, опытных образцах, так как развитию их мешала основная неразрешенная проблема, от которой зависит правильное действие автоматического оружия, — унитарный металлический патрон.

Унитарный металлический патрон введен был в 60-х годах прошлого столетия. Эти патроны снаряжались черным (дымным) порохом, при котором трудно добиться отладки автоматики из-за непостоянства режимов давлений (бездымный порох получен французским инженером Вьелем в 1886 г.).

Практически ощутимых результатов в создании автоматического оружия достиг Хайрам Максим, который в 1883 г. переделал американское ружье типа Винчестер под автоматическое. Использовав отдачу всего оружия и применив специальный приклад, он получил образец с автоматическим открыванием затвора при выстреле и экстрактированием гильзы (рис. 8). Последовательными работами Максим добился в 1888 г. создания пулемета, который почти без изменений применяется и сейчас.

Вслед за конструкцией Максима начали появляться пулеметы различных изобретателей, и пулемет как новое оружие

стал постепенно вводиться на вооружение войск. Однако память о неудачном применении картечниц была еще свежа, и доводы относительно неприемлемости картечниц почти целиком переносились на пулеметы. Несмотря на то, что к этому времени пехота имела весьма совершенное оружие — магазинные винтовки, пулемет не встретил благожелательного отношения как оружие против пехоты, обеспечивающее действительный огонь с дальних дистанций.

Недоверие к пулемету возрастало также из-за сложности конструкции, быстрого износа ствола и деталей, наличия задержек и „непомерного" расхода боеприпасов. Даже на родине пулемета — в Англии — он был введен на вооружение полевых войск только к концу 90-х годов. В России в качестве опыта в 1900 г. было сформировано пять пулеметных рот, приданных некоторым дивизиям.

Опыт русско-японской войны (1904—1905 гг.) показал, что пулемет в руках пехоты является мощным огневым средством, к тому же не только оборонительным, но и наступательным.

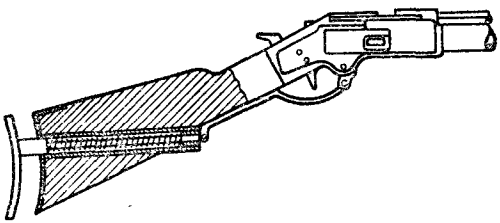


Рис. 8. Автоматическое ружье Максима.

Пулеметное дело до первой империалистической войны развивалось главным образом в направлении станковых типов. Мировая война 1914—1918 гг. выдвинула новые требования к автоматическому оружию: для пехоты требовались ручные пулеметы; для новых родов войск — авиации и танков — специальные авиационные и танковые пулеметы.

Современное автоматическое оружие, принятое на вооружение воздушных сил, занимает особое место в системе вооружения войск и определяется условиями воздушного боя, а также удобствами размещения на самолетах. Поэтому рассмотрим кратко историю вооружения летательных аппаратов.

Идея вооружения воздушных судов возникла еще при первых шагах воздухоплавания.

Так, еще в 1812 г., когда Наполеон со своей 600-тысячной армией вторгся в пределы России, для устрашения и поражения неприятеля последовали самые различные и невероятные предложения.

Предложение немецкого механика Лешиха, в строгом секрете переданное царю Александру I через русского посланника при дворе вюртембергского короля, гласило: „Открытие сие состоит в управлении аэростатического шара, конструкции воздушного корабля, который вмещать будет в себя нужное число людей и снарядов для взрывания всех крепостей, для остановки и истребления армий".

По проекту Лешиха, длинная гондола должна была крепиться к баллону системой деревянных рам. Крыльчатые весла

устанавливались или в гондоле или на раме при баллоне. После рабочего хода весла отводились назад пружинами. Работать веслами должен был экипаж.

Леппих был доставлен в Москву инкогнито, и при попечении московского губернатора Растопчина он приступил к постройке своего „корабля".

Прошло время, Наполеон уже был изгнан из пределов России; на изобретение было истрачено около 200 000 руб., но ожидаемого „корабля" так и не получили. Леппих же был объявлен „сумасшедшим шарлатаном".

Вооружение аэростатических управляемых судов огнестрельным оружием стало возможным только тогда, когда эти суда достигли высокого совершенства (например, немецкие цеппелины перед войной 1914—1918 гг.).

Только с появлением аппаратов тяжелее воздуха — аэропланов — вопрос о вооружении и боевом применении летательных аппаратов стал на твердую основу.

Боевое применение авиации начинается с Триполитанской кампании (1911—1912 гг.), в которой итальянцы использовали самолеты как разведывательное средство. Кроме того, они сбрасывали с них сначала железные стрелы, ручные гранаты, а затем и небольшие бомбы.

Балканская война в 1912—1913 гг. способствовала подъему авиационной техники, усовершенствованию конструкций самолетов и их численному росту.

В начале первой империалистической войны 1914—1918 гг. не было еще четкой организации воздушных сил, не было правильного понимания тактических свойств самолетов и, главное, авиация совершенно не была вооружена. Единственное стрелковое оружие, которое было на самолетах в первые месяцы войны, — это личные автоматические пистолеты летчиков или карабины, а несколько позже — наземные ручные пулеметы без всякой установки. Вероятность поражения при стрельбе из них была ничтожна.

Уже в первые месяцы войны появилась настоятельная необходимость в воздушном противодействии широко развитой разведывательной деятельности самолетов противника. Эта необходимость увеличивалась по мере того, как разведывательная деятельность перерастала в бомбардировочную.

Развитие разведывательной и бомбардировочной деятельности самолетов вызвало появление истребительной авиации. Впервые для воздушного боя были применены двухместные разведывательные самолеты, на которых в кабине летнаба был установлен обычный наземный ручной пулемет (Льюиса, Мадсена), вначале совсем без крепления, а затем закрепляемый на простой шкворневой подставке. Эффективность стрельбы из такой подвижной установки по подвижной же цели была ничтожной.

В качестве истребителей необходимо было иметь самолеты с бо́льшими, чем у разведчиков, скоростью и маневренностью

и с таким вооружением, которое действовало бы эффективно независимо от маневра самолета.

Это можно было получить от одноместного самолета, вооруженного неподвижной установкой, жестко скрепленной с самолетом, стрельба из которой велась бы в направлении полета самолета, а прицеливание выполнялось направлением оси самолета.

Первые одноместные истребители были снабжены неподвижными установками, которые монтировались на верхней поверхности центроплана, вне зоны, ометаемой винтом. Однако такие установки не давали большого эффекта, так как оружие, удаленное от продольной оси самолета и от летчика, трудно было перезаряжать при задержках и трудно, почти невозможно было заменять магазин (пехотный образец Льюиса имеет магазин только на 47 патронов). Кроме того, нельзя было применять винты большего диаметра; сама же установка создавала значительное лобовое сопротивление, хотя это и не играло большой роли при существовавших тогда скоростях.

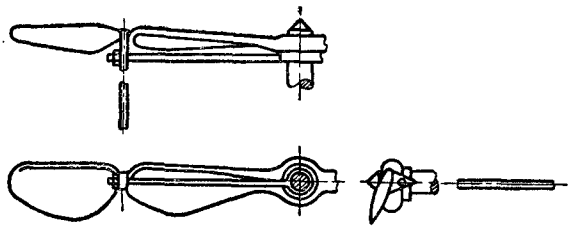


Рис. 9. Винт, отсекающий пули.

Приближение оружия к продольной оси самолета, а тем самым и к летчику, не только устраняло все указанные выше недостатки, но давало возможность применить оружие с ленточным питанием. Требовалось только разрешить задачу безопасной стрельбы между лопастями вращающегося винта. Эта задача была разрешена в конце 1914 г. французской фирмой Моран-Сольнье (Morane-Saulnier), которая, по предложению известного французского летчика лейтенанта Гарро (Garros), спроектировала специальный винт (рис. 9).

Винт состоял из двух частей, соединенных между собой треугольной призмой, пересекающей при вращении винта линию выстрела и отсекающей пули при возможных попаданиях. Такое устройство приводило к потере полезной мощности винта на 8—10% по сравнению с обычным винтом.

Французский офицер Бергуэн (Bergoin) предложил другое устройство. Он установил сзади обычного винта хорошо бронированную мулинетку, которая вращалась синхронно винту и отсекала пули. Однако это устройство не давало удовлетворительных результатов, так как число попаданий в мулинетку было велико, а рикошетировавшие пули отклонялись назад и наносили повреждение мотору. Опыт стрельбы на земле показал, что до 25% пуль в очереди встречались с мулинеткой и, значит, были потеряны.

В дальнейшем на обычный винт стали надевать особый отклонитель, который представлял собой треугольную призму, прочно закрепленную непосредственно на лопасти винта. Такое

устройство ничтожно мало изменяло к. п. д. винта и гарантировало безопасность летчику, так как попадавшие в призму пули отклонялись вверх или вниз.

Однако непроизводительный расход пуль хотя и снизился в этом случае, тем не менее все же был велик. Дело в том, что при стрельбе по подвижной цели прицельными в очереди обычно бывают первые пули; если же первые пули очереди попадают в отклонитель, то вероятность попадания последующих пуль в цель получается ничтожно малой.

Для того чтобы исключить попадания в винт, необходимо было согласовать момент пролета пулей плоскости вращения винта и момент пересечения лопастями винта линии выстрела. Это было осуществлено в начале 1915 г. французским лейтенантом Альканом (Alkan), опять при установке пулемета Льюиса.

Пулемет Льюиса с малым темпом стрельбы (450 выстрелов в минуту), магазинным питанием (емкость магазина—47 патронов) и, главное, из-за устройства автоматики не мог дать желаемых результатов. Неизбежное при синхронизации снижение скорострельности, которая и так очень невысока у этого пулемета, не могло повысить вероятности попадания. Устройство автоматики не обеспечивало от попаданий в лопасти винта, так как затвор пулемета Льюиса перед выстрелом находится в крайнем заднем положении, следовательно, и время движения автоматики непостоянно.

В середине 1915 г., когда авиацию снабдили пулеметами Виккерса с ленточным питанием, темп стрельбы которых при помощи ускорителя был доведен до 960 выстрелов в минуту и которые по устройству и действию автоматики удовлетворяли требованиям синхронной стрельбы, — проблема синхронизации была разрешена.

В это же время в Германии фирма „Фоккер“ создала синхронизатор под пулемет Максима.

Изобретения немедленно были заимствованы другими воюющими странами, в результате чего появилась истребительная авиация. Это внесло крупные изменения в организацию ВВС, а также в тактику и технику боевого применения самолетов.

Разведывательные самолеты уже не могли безнаказанно летать над территорией противника. Вначале защита таких самолетов возлагалась на специально вооруженные самолеты службы охраны. Самолеты охранения, сведенные затем в специальные отряды, в Германии стали применять для действий против наземных целей, положив тем самым начало штурмовой авиации.

Бомбардировочные самолеты, заходившие глубоко в тыл и имевшие своим противником только зенитную артиллерию, должны были теперь сами решать задачу обороны в воздухе. Для этого бомбардировщиков стали вооружать стрелковыми подвижными установками.

Если до появления истребительной авиации число самолетов, сбитых случайными попаданиями, насчитывалось едини-

цами, то уже в конце 1915 г. и особенно в 1916 и 1917 гг. число самолетов, сбитых в воздушном бою, насчитывается сотнями.

В дальнейшем развитии военных воздушных сил схемы вооружения истребительных, особенно одноместных и одномоторных самолетов претерпели ряд изменений, и в настоящее время эти схемы весьма разнообразны. Несмотря на разнообразие в расположении установок, соотношении числа пушек и пулеметов, различие в их калибре и т. д., установки для стрельбы через винт занимают основное место в системе вооружения истребительной авиации.

Стрельба через винт предъявляет к оружию, боеприпасам и установкам ряд особых требований, которые необходимо учитывать при их проектировании и технической эксплоатации.

Наличие истребительной авиации, значительное улучшение летных данных самолетов (увеличение скоростей, лучшая маневренность и т. п.), а следовательно, более сложные условия воздушного боя потребовали разработки для вооружения самолетов специальных установок и оружия.

С появлением турели в конце 1916 г. была решена задача быстрого переноса огня без маневра самолетом, что увеличило сферу обстрела. Одновременно сконструировано было несколько специальных авиационных пулеметов: Льюис, Парабеллум, Мадсен, Виккерс и др., представляющих собой некоторое видоизменение наземных пулеметов с учетом особенностей установки их на самолете.

На турели, как правило, сначала ставили одиночные пулеметы. Рост скоростей самолетов потребовал увеличения и скорострельности оружия. Старые конструкции пулеметов не могли дать необходимой скорострельности; поэтому данную проблему стали решать способом спаривания оружия. Спаривание осуществлялось механическим соединением на турели двух пулеметов, автоматика которых работала независимо одна от другой.

В 1918 г. в германской авиации появляется двуствольный пулемет Гаста (рис. 10). В пулемете Гаста стрельба велась поочередно из каждого ствола, причем автоматика устроена была таким образом, что отдача при выстреле в одном стволе использовалась для перезаряжания и выстрела в другом. Патроны к пулемету подавались из двух окрашенных в разные цвета магазинов — левого и правого, вставляемых в особые корзины сбоку пулемета. Каждый магазин — емкостью на 130 патронов. Скорострельность — до 1 200 выстрелов в минуту. Пулемет не получил дальнейшего развития, так как задержка или осечка в одном из стволов приводила к остановке стрельбы из другого.

Новые, более сложные формы воздушного боя предрешили вопрос и о вооружении самолетов пушками, позволяющими вести огонь с дальних дистанций и снарядами более разрушительного действия.

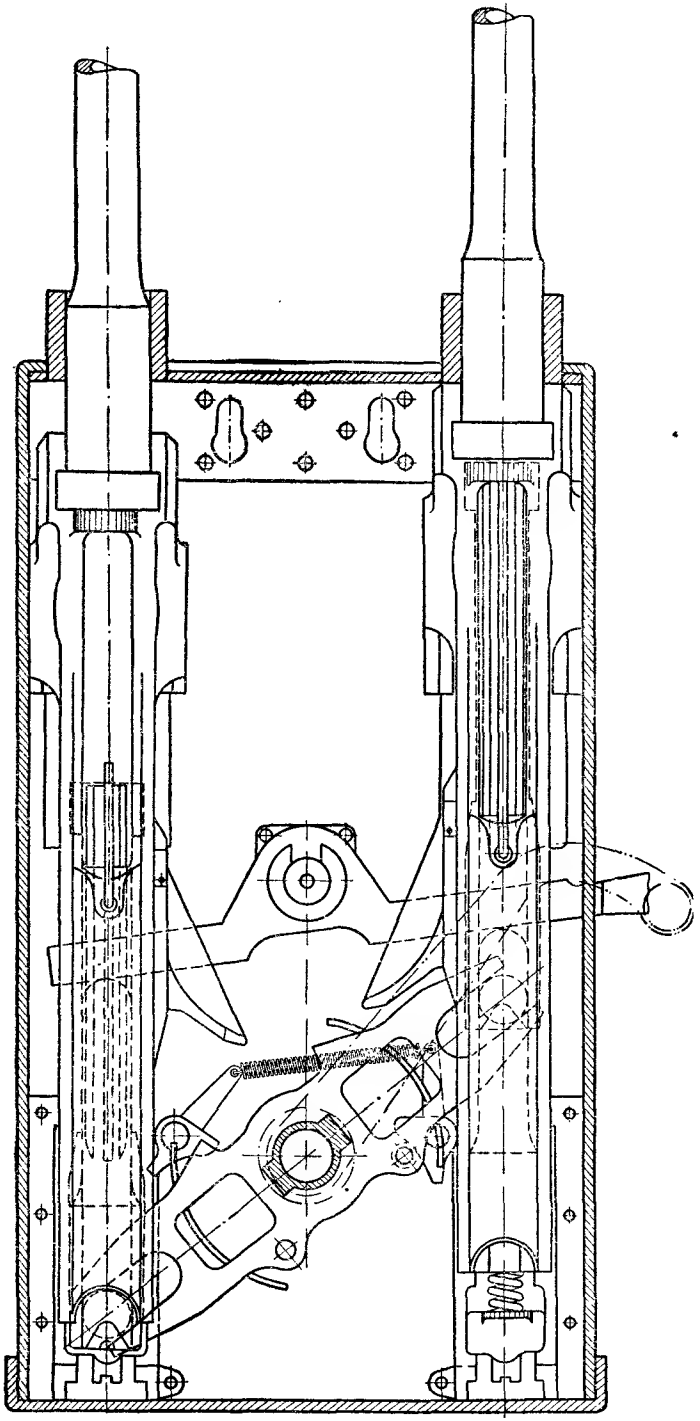


Рис. 10. Двуствольный пулемет Гаста.

Уже в 1915 г. появились самолеты, вооруженные пушками; последние представляли собой обычные образцы батальонной артиллерии с несколько укороченным стволом или орудия, снятые с наземных сооружений (капонирные орудия и т. п.), калибра обычно 37 *мм*.

Пушки эти, хотя и полуавтоматические, но с одиночным заряжанием, малой скорострельностью, с относительно большим весом при отсутствии специального прицела, а главное — с большой энергией отдачи, разрушающе действующей на самолет, широкого распространения не получили. На рис. 11 изображена подобная установка 37-*мм* пушки с прожектором (1915 г.).

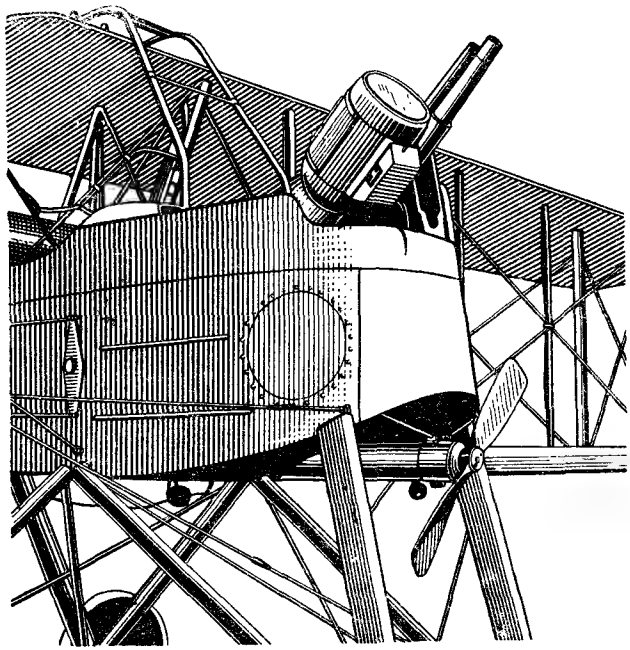


Рис. 11. Установка 37-*мм* пушки на самолете.

Конструкции истребительных самолетов не допускали жесткого монтирования имеющихся пушек к какой-либо части фюзеляжа. Поэтому, по мысли летчика Гинемера, французская фирма „Испано-Сюиза“ в 1917 г. спроектировала и изготовила так называемую мотор-пушку, позволяющую вести стрельбу через втулку винта [1]. Конструкция представляла собой V-образный мотор мощностью 180 *л. с.* с редуктором. Между блоками цилиндров мотора монтировалась 37-*мм* пушка; стрельба из нее велась через втулку винта.

[1] Справедливости ради следует отметить, что установка, работающая на данном принципе, была запатентована в Германии еще в 1913 г. (патент № 290120, класс 62-в-22, от 11 января 1913 г.), но, очевидно, была забыта немцами.

Мотор-пушка более совершенной конструкции для того же вида боевого применения вновь появляется в наши дни и занимает сейчас в системе авиационного вооружения решающее место.

Таким образом, к концу первой империалистической войны авиация окончательно сформировалась в род войск, способный решать целый ряд боевых задач.

Несмотря на наличие своих конструкторов и летчиков, царская Россия по состоянию своих производительных сил не смогла поставить и развить самолетостроение. До Великой Октябрьской социалистической революции русская авиация создавалась исключительно за счет иностранной материальной части.

В первую империалистическую войну Россия вступила в основном с французскими самолетами: Фарман-16 (биплан) и Ньюпор (моноплан). В небольшом числе были самолеты Депердюссен и русские тяжелые самолеты „Илья Муромец".

Однако на путь тяжелого самолетостроения Россия вступила раньше других стран. История развития тяжелой авиации начинается с постройки Сикорским в 1913 г. четырехмоторного биплана „Гранд", позже названного „Русский витязь". Самолет этот имел значительный полетный вес (3,6 *т*) и был снабжен четырьмя моторами „Аргус" по 100 *л. с.*, поставленными сначала тандем, а затем впереди на крыльях в один ряд, с независимым питанием и управлением; хвостовое оперение было вынесено далеко назад. Таким расположением моторов и вынесенными далеко назад рулями поворота был разрешен вопрос о продолжении полета в случае остановки одного из моторов, так как вращающий момент от несимметричной тяги винтов компенсировался рулями поворотов.

На самолете этой конструкции, имевшем специальную площадку, по которой экипаж мог ходить, не нарушая устойчивости самолета, была доказана возможность применения бомб большого веса. При сбрасывании бомб положение центра тяжести мало изменялось благодаря размещению бомб вблизи него.

Зимой 1913/14 г. был создан еще более мощный самолет „Илья Муромец" (полетный вес 4,1 *т*), по улучшенному образцу которого построена участвовавшая в войне 1914—1918 гг. „эскадра воздушных кораблей".

На опыте „эскадры воздушных кораблей" были разработаны принципы бомбометания, которые значительно позже были приняты и в других странах, отставших в разработке конструкций тяжелых самолетов. Однако численность тяжелых кораблей ограничилась упомянутой выше „эскадрой".

Из наследства, оставшегося от старой армии и состоявшего из 91 авиационного и 77 воздухоплавательных отрядов, в конце 1917 г. было сформировано 33 авиационных и 10 воздухоплавательных отрядов, которые послужили основой формирования Красного воздушного флота. Вследствие громоздкости организации, недостаточности и устарелости материальной части число этих отрядов в дальнейшем было значительно уменьшено.

На самолетах устаревших конструкций, „латанных“ и „перелатанных“, применяя вместо бензина различные суррогаты, авиация Красной Армии на всех фронтах гражданской войны завоевала себе неувядаемую славу, героически борясь с врагами пролетарской революции.

Послевоенные годы в области развития военных воздушных сил можно разбить на три характерных периода.

Первый период (1918—1923 гг.) отмечается резким падением численности боевой авиации вследствие вывода из строя устаревших конструкций и недостаточного пополнения новыми. Такая же картина наблюдалась и в области вооружения самолетов, которое до 1924 г. не претерпело почти никаких изменений и улучшений по сравнению с периодом конца мировой войны.

Второй период (1924—1929 гг.) характерен быстрым увеличением состава боевой авиации, вводом в строй самолетов новых конструкций, значительными работами по развитию и усовершенствованию вооружения и оборудования. В этот период в главных капиталистических странах (после больших дискуссий) авиация выделилась в самостоятельный род войск с подчинением воздушным министерствам.

Наконец, третий период (с 1929 г. и до настоящего времени) отличается весьма высокими темпами развития авиационной техники. В этот период вооружение самолетов в целом претерпело существенные изменения. Крупные изменения произошли и в системе стрелково-пушечного вооружения самолетов.

Современное боевое применение самолетов, их конструкции и аэродинамические качества предъявляют целый ряд особых требований к стрелково-пушечному вооружению самолетов, которое отличается большим разнообразием специальных авиационных образцов оружия различных калибров с высокой эффективностью действия.

Глава I

ПОЛУЧЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

§ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВНУТРЕННЕЙ БАЛИСТИКИ

Закон давлений пороховых газов, образующихся в канале орудия во время выстрела, находят из решения основной задачи внутренней балистики. Эта задача охватывает две фазы горения пороха:

а) при постоянном объеме — от момента воспламенения заряда до форсирования снаряда, т. е. до врезания его пояска в нарезы (пиростатический период t'_a).

б) при переменном объеме — от форсирования снаряда до конца горения заряда (пиродинамический период $o - t_k$) с последующим расширением пороховых газов до момента прохождения дном снаряда дульного среза t_0 (см. диаграмму, рис. 12).

Истечение пороховых газов из орудия после этого момента составляет предмет „промежуточной" балистики, рассматривающей явление так называемого последействия пороховых газов. В этот период орудие подвергается действию реакции истечения пороховых газов до тех пор, пока давление в канале не сравняется с атмосферным; снаряд же испытывает действие извергающихся газов до расстояния в 25 калибров от дульного среза. Вследствие этого дульная скорость снаряда получает некоторое приращение (до 2,5%): большее — при коротких орудиях и малых начальных скоростях и меньшее — при длинных орудиях с начальными скоростями снаряда, превосходящими скорость звука, т. е. $v_0 > 330$ *м/сек*.

Этот параграф касается лишь постановки задачи внутренней балистики, а вопросы, связанные с последействием пороховых газов, рассмотрены в § 38, 40 и 41.

Воспламенение заряда происходит в результате разбития капсюля и взрыва находящейся в нем гремучей ртути с ударным составом; при этом образуется сильный луч огня, воспламеняющий порох с некоторым начальным давлением ($p_в \approx 20$ *ат*), что в известной мере способствует стабилизации промежутка времени t'_a.

При решении основной задачи внутренней балистики обычно пренебрегают начальным давлением $p_в$ от сгорания воспламенителя. Для того чтобы капсюль был разбит, необходим достаточный запас кинетической энергии ударника, что зависит от калибра орудия и устройства капсюля. Так, считают необходимым

для пистолетных патронов $E = 0{,}02 \div 0{,}03$ *кгм*
„ винтовочных „ $E = 0{,}07 \div 0{,}09$ „

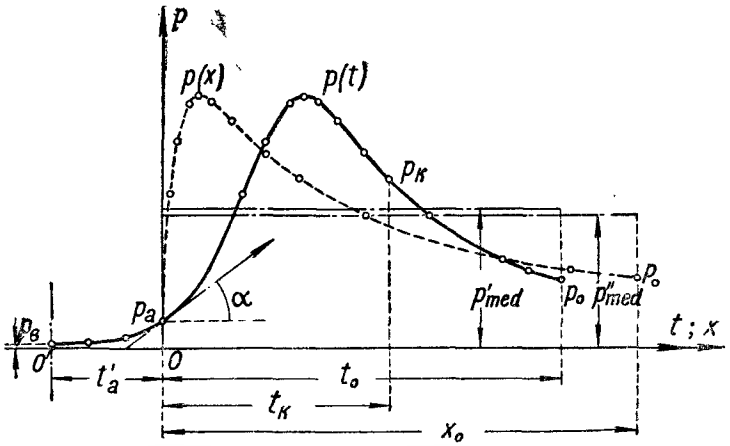


Рис. 12. Комбинированная диаграмма давлений пороховых газов: в функции пути x и в функции времени t; x_o — абсолютный путь снаряда по каналу до дульного среза.

Уравнение состояния газа во внутренней балистике выражают формулой Ван-дер-Ваальса (Van der Waals):

$$p(W - \alpha) = RT;$$

где p — давление в *кг/дм²*;
W — удельный объем в *дм³/кг*;
α — коволюм газообразных продуктов разложения в *дм³/кг*;

$R = \frac{p_1 W_1}{273^\circ}$ — газовая постоянная, характеризующая работу, которую совершает 1 *кг* газа при нагревании его на 1° С и давлении $p_1 = 1$ *ат*;

T — абсолютная температура, выражаемая в безразмерных единицах — градусах Кельвина (Kelvin) — и отсчитываемая от точки абсолютного нуля —273° С (Celsius).

Если задан вес взрывчатого вещества ω и действительный объем w, занимаемый газообразными продуктами разложения пороха, то уравнение состояния газа можно написать в виде:

$$p(w - \alpha\omega) = \omega RT. \qquad (1)$$

При взрыве заряда пороха в замкнутом изолированном объеме w_a получится максимальное давление p_{max} и максимальная температура взрывчатого превращения T_1. Из формулы (1) находим для этого случая:

$$p_{max} = \frac{\omega RT_1}{w_a - \alpha\omega} = \frac{f\omega}{w_a - \alpha\omega} = \frac{f\Delta}{1 - \alpha\Delta} = \frac{f\Delta}{\lambda_1}, \qquad (2)$$

где $f = RT_1$ — *сила пороха* — величина, имеющая размерность работы на единицу веса: *кг дм/кг*;

$\Delta = \frac{\omega}{w_a}$ — плотность заряжания в *кг/дм*^{3};

$\lambda_1 = 1 - \alpha\Delta$ — относительная длина свободного объема каморы по окончании горения пороха с учетом коволюма (по отношению к длине каморы, принимаемой за единицу).

Решение задачи пиродинамики основывается в настоящее время на следующих допущениях.

1. Камору, в которой помещается заряд пороха, заменяют цилиндром с основанием S_0, равным площади поперечного сечения канала ствола с учетом нарезов, и длиной l_1, определяемой из условия равенства объемов:

$$l_1 = \frac{w_a}{S_0}, \qquad (3)$$

где w_a — начальный объем каморы. Величину l_1 называют *приведенной длиной каморы.*

2. Совокупность тел: снаряд — заряд — орудие, рассматривают как изолированную систему, подверженную действию только внутренних сил; некоторое ограничение в эту предпосылку вносит лишь устранение вращательного движения орудия в сторону, обратную вращению снаряда, вследствие реакции лафета или станка.

3. Массу твердых частей заряда и газообразных продуктов сгорания пороха считают равномерно распределенной по всему объему заснарядного пространства.

4. Скорости движения отдельных слоев газовой смеси подчиняют линейному закону. На диаграмме рис. 13 этот закон распределения скоростей по длине заснарядного пространства изображен прямой линией, соединяющей конец ординаты v — скорости снаряда — с концом ординаты W — скорости свободного отката орудия.

5. Давление в заснарядном пространстве заменяют расчетным баллистическим давлением p, одинаковым во всех слоях газовой смеси в данный момент времени. Это делается благодаря искусственному присоединению энергии порохового заряда и откатных частей к общему балансу энергетических потерь всех видов.

Таким образом, балистическое давление p определяют из условия, что элементарная работа этого давления на полном приращении объема заснарядного пространства $dw = S_0\,dl$ равна приращению живой силы некоторой фиктивной массы снаряда:

$$p\,dw = pS_0\,dl = \varphi\,d\left(\frac{mv^2}{2}\right); \qquad (4)$$

l — относительный путь снаряда по отношению к орудию, откатывающемуся назад;

φ — коэфициент фиктивности, больший единицы.

Эти упрощения в постановке задачи несколько противоречат физической сущности явлений, сопровождающих выстрел, но дают в общем решение, вполне приемлемое для практических целей, чем и приходится довольствоваться, так как более точного решения до сих пор получить не удалось [1].

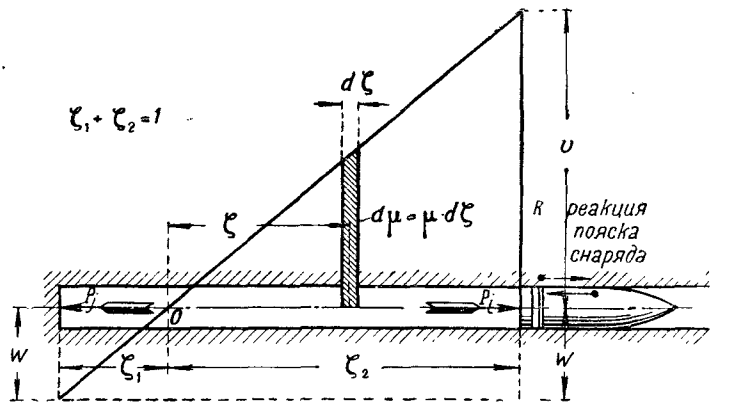


Рис. 13. Диаграмма распределения скоростей газовых слоев по длине заснарядного пространства:

P_j — сила действия пороховых газов на ствол; P_i — сила действия пороховых газов на снаряд.

Следует указать, что принятие допущений по пп. 4 и 5 приводит к необходимости определять давление на дно снаряда и давление на дно канала двумя приемами:

1) давление на дно снаряда p_i находится при помощи закона работы и живых сил на основе формулы (4);

2) давление на дно канала p_j отыскивается по закону импульсов сил и количества движения.

Это является следствием искусственности наших допущений.

---

1 Отметим работы в этом направлении следующих авторов: акад. С. А. Чаплыгин, Опыт применения уравнений гидродинамики к вопросу о движении снаряда в канале орудия, т. III, стр. 120—164; проф. В. А. Фок, О движении газов в канале орудия во время выстрела, Бюллетень СНР АНИМИ, № 2, 1935

§ 2. ФОРМУЛЫ, ВЫТЕКАЮЩИЕ ИЗ ЧИСТО МЕХАНИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Приведем некоторые формулы, относящиеся к задаче внутренней балистики и необходимые для дальнейших расчетов. При этом будем пользоваться следующими обозначениями:

q; $m = \frac{q}{g}$ — вес и масса снаряда;

Q_0; $M_0 = \frac{Q_0}{g}$ — вес и масса откатных частей;

ω; $\mu = \frac{\omega}{g}$ — вес и масса порохового заряда;

x; $v = \frac{dx}{dt}$ — абсолютные путь и скорость снаряда;

ξ; $W = \frac{d\xi}{dt}$ — абсолютные путь и скорость откатных частей; эти величины иначе называются: путь и скорость свободного отката;

l; $v_r = \frac{dl}{dt}$ — относительные путь и скорость снаряда по отношению к орудию;

p_i; $P_i = p_i S_0$ — удельное давление и сила действия пороховых газов на дно снаряда;

p_j; $P_j = p_j S_0$ — удельное давление и сила действия пороховых газов на дно канала.

При движении снаряда по нарезному орудию на боевых гранях нарезов возникает *реакция связи* R пояска снаряда с телом орудия, одинаково действующая как на снаряд, так и на орудие в сторону, противоположную их движению. Поэтому движение снаряда вперед и движение откатных частей назад можно выразить дифференциальными уравнениями:

$$m\ddot{x} = P_i - R;$$

$$M_0\ddot{\xi} = P_j - R.$$

Изучение вопроса о реакции связи R показывает, что при нарезке постоянной крутизны, которая только и применяется в малокалиберном оружии, эта реакция связи пропорциональна $m\ddot{x}$, т. е. может быть представлена формулой

$$R = \nabla \cdot m\ddot{x}, \tag{5}$$

где ∇ — коэфициент пропорциональности.

Эта величина, с которой мы встретимся при изучении классификации автоматического оружия, является существенным фактором, определяющим работу автоматики некоторых систем (см. § 11).

Подстановка выражения R дает новый вид диференциального уравнения движения снаряда:

$$P_i = p_i S_0 = (1 + \nabla) m\ddot{x}, \tag{6}$$

не содержащий R в явном виде и поэтому более удобный для преобразований.

По аналогии с этим напишем:

$$P_j = p_j S_0 = (1 + \nabla_0) M_0 \ddot{\xi}. \tag{7}$$

Четвертое допущение позволяет установить соотношение между скоростями W и v на основании закона количеств движения:

$$W = \frac{m + 0{,}5\,\mu}{M_0 + 0{,}5\,\mu} v = \frac{m'}{M'} v, \tag{8}$$

или

$$W = \frac{q + 0{,}5\,\omega}{Q_0 + 0{,}5\,\omega} v = \frac{q'}{Q'} v.$$

В данном случае имеем:

$$\left.\begin{aligned} m' &= m + 0{,}5\,\mu; \\ M' &= M_0 + 0{,}5\,\mu. \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Примечание. У различных величин, полученных в результате преобразований, основанных на законе импульсов сил (аргумент — время) и количеств движения (mv), будем ставить штрих в соответствии с первой степенью скорости в этом законе.

Если же преобразование основывается на законе работы (аргумент — путь) и живых сил $\left(\frac{1}{2} mv^2\right)$, то будем применять два штриха в соответствии со второй степенью скорости в этом законе. Такие обозначения будут способствовать устранению путаницы, в частности, например, между понятиями средних величин при различных аргументах интегрирования: p'_{med}, p''_{med}; v'_{med}, v''_{med} и т. д.

Соотношение между массами m' и M' приводит к установлению понятия *коэфициент взаимодействия масс*:

$$\chi = 1 + \frac{m'}{M'}, \tag{10}$$

что непосредственно вытекает из преобразований результатов, получаемых после интегрирования уравнения (8) в пределах от $t = 0$ до произвольного момента времени t.

$$\xi = \int_0^t W\,dt = \frac{m'}{M'} \int_0^t v\,dt = \frac{m'}{M'} x = \frac{m'}{M'} (l - \xi).$$

Отсюда находим:

$$\xi = \frac{m'}{M' + m'} l;$$

$$x = l - \xi = \frac{M'}{M' + m'} l = \frac{l}{\chi}. \qquad (11)$$

При выбранной схеме движения газовой смеси величина χ постоянна, поэтому после диференцирования выражения (11) получим простое соотношение между относительными и абсолютными скоростями снаряда:

$$v_r = \chi v_a, \qquad (12)$$

где v_a — абсолютная скорость.

Этих понятий и обозначений достаточно, чтобы выразить формулами те величины, с которыми придется оперировать в дальнейшем.

Значение коэфициента пропорциональности ∇, который будем называть *коэфициентом влияния нарезов*, для снарядов с ведущими поясками выражается формулой

$$\nabla = \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \chi \cdot \operatorname{tg}\theta \frac{\operatorname{tg}\theta + f}{1 - f \cdot \operatorname{tg}\theta},$$

где θ — угол наклона нарезов к продольной образующей канала ствола, причем

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\pi}{N},$$

если N — длина хода нарезов в калибрах;

f — коэфициент трения пояска снаряда о боевые грани нарезов;

ρ — радиус инерции снаряда;

r — полукалибр снаряда.

Если точный расчет снаряда не выполнен, то можно полагать приближенно

$$\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \approx \begin{cases} 0{,}45 & \text{для сплошных снарядов (пули);} \\ 0{,}60 & \text{для тонкостенных фугасных снарядов.} \end{cases}$$

Для авиационного малокалиберного оружия примем

$$\nabla = 0{,}02 + \frac{0{,}20}{\sqrt{d}} \qquad (13)$$

(где d — в *мм*), учитывая (особенно для пуль, не имеющих пояска и врезающихся в нарезы своей оболочкой) некоторые дополнительные виды сопротивлений.

Формулу для коэфициента перехода от давления балистического p к давлению на дно снаряда p_i будем писать в виде:

$$k_b = \frac{p}{p_i} = 1 + \frac{0{,}333}{1+\nabla} \cdot \frac{\omega}{q} \cdot \frac{1}{\chi}, \tag{14}$$

а коэфициент перехода от давления на дно снаряда p_i к давлению на дно канала p_j выражать формулой:

$$k_j = \frac{p_j}{p_i} = 1 + \frac{0{,}500}{1+\nabla} \cdot \frac{\omega}{q}(2-\chi). \tag{15}$$

После этого можно представить коэфициент, входящий в формулу (7), с достаточной степенью точности в таком виде:

$$\nabla_0 = \frac{\nabla}{k_j}. \tag{16}$$

Примечание. Включение в формулы (14) и (15) множителей с коэфициентом взаимодействия масс χ делает их более универсальными и применимыми даже к авиационным пушкам Дэвиса, стреляющим в разные стороны боевым и паразитным снарядами равного веса.

Возвращаясь к формуле (4) и принимая во внимание зависимость (12), выразим теперь уравнение работы и живой силы двумя способами:

1) через абсолютную скорость поступательного движения снаряда:

$$p\,dw = \varphi_a d\left(\frac{1}{2} m v_a^2\right), \tag{17}$$

где коэфициент фиктивности

$$\varphi_a = (1+\nabla)\chi \cdot k_b; \tag{18}$$

2) через относительную, или релятивную, скорость $v_r = \chi v_a$:

$$pS_0\,dl = \varphi_r d\left(\frac{1}{2} m v_r^2\right). \tag{19}$$

Отсюда получаем зависимость:

$$\varphi_r = \frac{1+\nabla}{\chi} k_b. \tag{20}$$

Уравнения (17) и (19) можно было бы соединить знаком равенства, так как левые части их выражают одно и то же понятие элементарной работы пороховых газов, которая в первом случае равна произведению давления p на абсолютное увеличение dw объема заснарядного пространства, а во втором случае равна произведению полной силы $P = pS_0$, действующей в поперечном сечении S_0 канала, на относительное перемещение dl дна снаряда по отношению ко дну канала. Поэтому пра-

вые части равенств (17) и (19) представлены либо через абсолютные, либо через относительные скорости поступательного движения снаряда с соответствующими коэфициентами фиктивности.

При решении задач внутренней балистики удобнее пользоваться формулами (19) и (20), так как в этом случае численное решение самой балистической задачи оказывается независимым явно от коэфициента взаимодействия масс χ. Этот коэфициент может изменяться вообще в довольно широких пределах, начиная от значений, близких к единице в обычных артиллерийских системах с относительно тяжелыми откатывающимися частями, когда $M' \gg m'$, до значений порядка $\chi = 1{,}10$ в коротких и легких пушках (гаубицах) или в автоматическом оружии с так называемым свободным затвором, а в пушках Дэвиса — до $\chi = 2$.

Упомянутые выше зависимости будем применять не только при обработке решения задачи внутренней балистики, но и для контроля получаемых результатов. Так, например, если будет дана диаграмма балистического давления p в функции относительного пути снаряда l, то, вычислив площадь диаграммы при помощи формул квадратур, можно проверить тождественность равенства

$$\int_0^{l_0} pS_0\,dl = k_b \int_0^{l_0} p_i S_0\,dl = \chi k_b \int_0^{x_0} p_i S_0\,dx =$$

$$= (1+\nabla)\chi k_b \frac{mv_0^2}{2} = \varphi_a \frac{mv_0^2}{2}.$$

Если же диаграмма балистического давления дана в функции времени t, то должно быть тождественно справедливым равенство

$$\int_0^{t_0} pS_0\,dt = k_b \int_0^{t_0} p_i S_0\,dt = (1+\nabla)\,k_b\,mv_0.$$

Отсюда находим значения средних ординат давления в аргументе пути:

$$\left.\begin{aligned} (p)''_{\text{med}} &\equiv (1+\nabla)\chi k_b \frac{mv_0^2}{2S_0 l_0} \equiv (1+\nabla)\,k_b \frac{mv_0^2}{2S_0 x_0}; \\ (p_i)''_{\text{med}} &\equiv (1+\nabla)\chi \frac{mv_0^2}{2S_0 l_0} = (1+\nabla) \frac{mv_0^2}{2S_0 x_0}; \end{aligned}\right\} \qquad (21)$$

в аргументе времени:

$$\left.\begin{aligned} (p)'_{\text{med}} &\equiv (1+\nabla)\,k_b \frac{mv_0}{S_0 t_0}; \\ (p_i)'_{\text{med}} &\equiv (1+\nabla) \frac{mv_0}{S_0 t_0}. \end{aligned}\right\} \qquad (22)$$

Взяв отношение величин p'_{med} и p''_{med}, найдем весьма интересную связь между кинематическими элементами:

$$\vartheta = \frac{p'_{\text{med}}}{p''_{\text{med}}} = \frac{(p_i)'_{\text{med}}}{(p_i)''_{\text{med}}} = \frac{2x_0}{t_0 v_0},$$

где ϑ есть величина, зависящая от вида действующей нагрузки.

Эта связь первоначально и была положена в основу метода квадратур проф. Е. Л. Бравина [см. § 5, раздел Б, формула (65)].

Приведем также формулы, относящиеся к чисто механическим вопросам: они понадобятся в главе о боеприпасах.

Реактивный момент, действующий на орудие вследствие реакции пояска снаряда и обычно передаваемый цапфами на установку, можно рассчитывать так:

$$M \approx \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \chi \frac{rP_i}{1+\nabla} \operatorname{tg} \theta. \tag{23}$$

Для суммарной реакции n боевых граней, подверженных действию соприкасающихся с ними площадок пояска снаряда, имеем формулу:

$$N = nS_N = \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \chi \frac{P_i}{1+\nabla} \cdot \frac{\operatorname{tg}\theta}{\cos\theta - f \cdot \sin\theta} \approx \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \chi \frac{P_i}{1+\nabla} \operatorname{tg}\theta.$$

Отсюда находим силу, сминающую единичную площадку пояска,

$$S_N \approx \frac{1}{n}\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \chi \frac{P_i}{1+\nabla} \operatorname{tg}\theta \tag{24}$$

и работу трения для единичной реакции на всем пути снаряда:

$$T'_f = \frac{f}{n}\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \chi \frac{\operatorname{tg}\theta}{1+\nabla} \int_0^{l_0} P_i\, dl = \frac{f}{n}\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \chi^2 \cdot \operatorname{tg}\theta \frac{mv_0^2}{2}. \tag{25}$$

§ 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПИРОДИНАМИКИ ПО СПОСОБУ проф. Н. Ф. ДРОЗДОВА

Для решения задачи пиродинамики проф. Н. Ф. Дроздов принимает следующие допущения:

1. Воспламенение порохового заряда происходит мгновенно по всей поверхности зерен.
2. Бездымные пороха сгорают параллельными слоями.
3. Скорость горения пороха u пропорциональна давлению:

$$u = u_1 p,$$

где u_1 условно является как бы скоростью горения при давлении $p = 1$ *ат*.

Далее проф. Н. Ф. Дроздов вводит такие обозначения:

Наименование величин	В момент начала движения снаряда	В произвольный момент времени t	В момент t_m	В момент t_k
Половина толщины, на которую сгорело зерно	e_a	e	e_m	$e_k = e_1$
Относительная толщина сгоревшего слоя $\zeta = \frac{e}{e_1}$ . .	ζ_a	ζ	ζ_m	$\zeta_k = 1$
То же за время движения снаряда $z = \zeta - \zeta_a$	$z = 0$	z	z_m	$z_k = 1 - \zeta_a$
Относительное количество сгоревшего пороха	ψ_a	ψ	ψ_m	$\psi_k = 1$

Индекс m соответствует давлению p_{max}, индекс k — концу горения пороха, а индекс a — моменту форсирования.

Связь ψ с величиной ζ или аргументом z устанавливается при помощи характеристик формы зерна: $\varkappa'$ и λ':

$$\psi = \varkappa'\zeta - \varkappa'\lambda'\zeta^2.$$

Написав уравнение горения пороха:

$$u = \frac{de}{dt} = u_1 p$$

и диференциальное уравнение движения снаряда на основании формулы:

$$\varphi_r m \frac{dv_r}{dt} = pS_0 = \frac{S_0}{u_1} \cdot \frac{de}{dt} = \frac{S_0 e_1}{u_1} \cdot \frac{d\zeta}{dt} = \frac{S_0 e_1}{u_1} \cdot \frac{dz}{dt},$$

найдем после интегрирования этих уравнений в пределах от нуля до t:

$$v_r = \frac{S_0}{\varphi_r m} \int_0^t p\,dt = \frac{S_0 e_1}{u_1 \varphi_r m} z. \qquad (26)$$

В своем способе проф. Н. Ф. Дроздов вводит величину

$$B = \left(\frac{S_0 e_1}{u_1}\right)^2 \frac{1}{f\omega\varphi_r m}, \qquad (27)$$

которую будем называть *параметром заряжания*.

Этим замечательным приемом проф. Н. Ф. Дроздов сразу делает математическое решение задачи пиродинамики независимым явно: от калибра, размеров зерна, весовых данных, конструктивных и физических факторов, т. е. от величин: d, $S_0 = f(d)$; e_1; ω, q; χ, φ_r; f, u_1.

Вследствие этого уравнение (26) можно переписать в виде:

$$v_r = \frac{S_0}{\varphi_r m}\int_0^t p\,dt = z\sqrt{B\frac{f\omega}{\varphi_r m}}. \qquad (28$$

По этой формуле значение v_r может быть определено в функции аргумента $z=\zeta-\zeta_a$.

Введя понятие удельного пути снаряда по отношению к орудию и выражая его в долях приведенной длины каморы $\lambda=\frac{l}{l_1}$, получим:

$$l = l_1\lambda;$$

$$dl = l_1\,d\lambda.$$

Теперь на основании формулы (28) составим диференциальное уравнение пиродинамики:

$$\frac{S_0}{\varphi_r m}p = \frac{dz}{dt}\sqrt{B\frac{f\omega}{\varphi_r m}} = \frac{dz}{d\lambda}\cdot\frac{d\lambda}{dt}\sqrt{B\frac{f\omega}{\varphi_r m}} =$$

$$= \frac{dz}{d\lambda}\cdot\frac{v_r}{l_1}\sqrt{B\frac{f\omega}{\varphi_r m}} = \frac{dz}{d\lambda}\cdot\frac{z}{l_1}B\frac{f\omega}{\varphi_r m}.$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{d\lambda}{dz} = Bf\Delta\frac{z}{p}. \qquad (29)$$

Для давления p пишем основное уравнение пиродинамики:

$$p = \frac{f\Delta}{\lambda_\psi + \lambda}(\psi - 0{,}5\Theta Bz^2), \qquad (30)$$

где $\lambda_\psi = \lambda_\Delta - \psi(\lambda_\Delta - \lambda_1)$ — относительная длина свободного объема каморы к моменту, когда относительное количество сгоревшего пороха равно ψ, причем здесь

$\lambda_\Delta = 1 - \frac{\Delta}{\delta}$ — относительная длина свободного объема каморы до начала горения заряда;

$\lambda_1 = 1 - \alpha\Delta$ — то же по окончании горения заряда;

δ — плотность пороха (удельный вес);

$\Theta = \frac{c_{pm}}{c_{wm}} - 1$ — величина, зависящая от отношения средних теплоемкостей: при постоянном давлении c_{pm} и при постоянном объеме c_{wm}, так что $\frac{c_{pm}}{c_{wm}} = 1 + \Theta$;

ψ — относительное количество сгоревшего пороха, определяемое при помощи характеристик формы зерна:

$$\psi = k_1 z - \varkappa' \lambda' z^2 + \psi_a, \tag{31}$$

где

$$k_1 = \varkappa' - 2\varkappa' \lambda' \zeta_a. \tag{31'}$$

Система уравнений (29)—(31) достаточна для полного решения поставленной задачи при заданном сорте пороха и известной плотности заряжания Δ.

В результате из решения уравнений (29)—(31) получим в функции аргумента z величины: $\psi(z)$, $\lambda(z)$ и $p(z)$, а на основании формулы (28) найдем величину $v_r(z)$. Что касается времени t, то для его определения придется вновь использовать диференциальную зависимость

$$\frac{dl}{dt} = v_r$$

и затем определять квадратуру

$$t = \int_0^l \frac{dl}{v_r}, \tag{32}$$

которая вычисляется, однако, не так просто, как это могло бы показаться с первого взгляда, так как здесь при нижнем пределе, когда $v_r = 0$, подинтегральная функция обращается в бесконечность.

Этот вопрос имеет весьма важное значение в инженерном деле и связан вообще с перестроением диаграмм от одного аргумента к другому, например от аргумента пути к аргументу времени и обратно; поэтому здесь ему посвящен особый параграф. Сейчас же приведем формулы к окончательному виду, распространив прием исключения физических факторов из математического решения также на величины v и t.

Для этого перепишем уравнение (28) в таком виде:

$$v_r = \frac{dl}{dt} = l_1 \frac{d\lambda}{dt} = \frac{S_0 g}{\varphi_r q} \int_0^t p\, dt =$$

$$= z \sqrt{Bfg} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\varphi_r q}} = v_y \sqrt{\frac{\omega}{\varphi_r q}}.$$

Назовем *удельной скоростью* величину

$$v_y = z \sqrt{Bfg}. \tag{33}$$

Если эта величина известна, то можно просто найти и значение абсолютной скорости снаряда по формуле

$$v_a = \frac{v_r}{\chi} = v_y \frac{1}{\chi}\sqrt{\frac{\omega}{\varphi_r q}} = v_y \nu_v, \tag{34}$$

где *переходный множитель скоростей*

$$\nu_v = \frac{1}{\chi}\sqrt{\frac{\omega}{\varphi_r q}}. \tag{35}$$

Преобразуя формулу (32), получаем точно так же для времени:

$$t = \int_0^l \frac{dl}{v_r} = l_1 \int_0^\lambda \frac{d\lambda}{v_r} = l_1 \sqrt{\frac{\varphi_r q}{\omega}} \int_0^\lambda \frac{d\lambda}{v_y} = t_y \nu_t, \tag{36}$$

где

$$t_y = \int_0^\lambda \frac{d\lambda}{v_y} \tag{37}$$

есть *удельное время*, а *переходный множитель времен*

$$\nu_t = l_1 \sqrt{\frac{\varphi_r q}{\omega}} = \frac{l_1}{\chi \nu_v}. \tag{38}$$

Из формулы (37) ясно, что удельная скорость v_y есть производная от удельного пути по удельному времени:

$$v_y = \frac{d\lambda}{dt_y}.$$

Развивая далее эти понятия, можно найти значение удельного ускорения:

$$j_y = \frac{dv_y}{dt_y} = \frac{S_0 l_1}{\omega} g p = \frac{g}{\Delta} p. \tag{39}$$

Формула (39) позволяет написать квадратуру времен в виде:

$$t_y = \frac{\Delta}{g} \int_0^{v_y} \frac{dv_y}{p} = \int_0^{v_y} \frac{dv_y}{j_y}.$$

Однако эта формула в смысле численного решения может оказаться слабее формулы (37), если, не располагая данными p или j_y при равноотстоящих значениях v_y, придется прибегнуть к графической интерполяции. Кроме того, точность решения может значительно пострадать вследствие отбрасывания функциональной зависимости между t_y, v_y и λ.

Кроме сделанных преобразований, найдем еще выражение для производной давления p по времени t в начальной точке диаграммы.

Из формул (33) и (39) имеем:

$$\frac{dv_y}{dt_y}=\frac{dz}{dt_y}\sqrt{Bfg}=\frac{g}{\Delta}\,p.$$

Отсюда

$$\frac{dz}{dt_y}=\frac{p}{\Delta}\sqrt{\frac{g}{Bf}}.$$

Диференцируя формулу (30) по удельному времени, получим:

$$D_a=\left(\frac{dp}{dt_y}\right)_0=\left(\frac{dp}{dz}\cdot\frac{dz}{dt_y}\right)_0=$$

$$=p_a\sqrt{\frac{fg}{B}}\cdot\frac{\lambda_\Delta k_1}{[\lambda_\Delta-\psi_a(\lambda_\Delta-\lambda_1)]^2}=\frac{N_a}{\sqrt{B}}. \qquad (40)$$

Здесь через N_a обозначена величина, которая при заданном сорте пороха и начальном давлении форсирования p_a зависит только от плотности заряжания Δ, так как входящие в выражение для k_1 [см. формулу (31′)] величина ζ_a и величина ψ_a являются также функциями от плотности заряжания.

Так, величина ψ_a определяется, во-первых, уравнением (30) при $p=p_a$ в точке форсирования при $z=0$ и $\lambda=0$:

$$p_a=f\Delta\frac{\psi_a}{\lambda_\Delta-\psi_a(\lambda_\Delta-\lambda_1)};$$

откуда

$$\psi_a=\frac{\lambda_\Delta}{\frac{f}{p_a}\Delta+(\lambda_\Delta-\lambda_1)}; \qquad (41)$$

во-вторых, ψ_a связана с характеристиками формы зерна соотношением

$$\psi_a=\varkappa'\zeta_a-\varkappa'\lambda'\zeta_a^2. \qquad (42)$$

Значения N_a для стандартного пороха даются в приложении 1 специальной таблицей, вычисленной в основном по данным ζ_a и ψ_a, взятым из таблиц проф. Н. Ф. Дроздова. Числа N_a соответствуют временам t_y *сек/м*, увеличенным в 10^5 раз, и давлениям p *кг/см*^{2} при l_1 *м*, что для практических целей более удобно.

Для действительного времени t значение производной надо исправить масштабным множителем времен

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_0=\frac{D_a}{\nu_t}. \qquad (43)$$

Решение задачи пиродинамики облегчается тем, что для какого-либо сорта пороха заранее могут быть составлены таблицы величин p, v_y и t_y или функций, с помощью которых вычисляются их значения.

В настоящее время существуют таблицы проф. Н. Ф. Дроздова и таблицы АНИИ, издания 1933 г., вычисленные для стандартного пороха, применяемого в полевых орудиях. Однако в стрелковом оружии применяется нестандартный порох. Характеристики этих порохов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование величин	Размерность	Стандартный порох	Порох стрелкового оружия
Сила пороха f	$кг\,дм/кг$	950 000	900 000
Коволюм α	$дм^3/кг$	0,98	0,94
Плотность δ	$кг/дм^3$	1,60	1,60
Показатель политропы $(1+\Theta)$.	Безразмерная величина	1,20	1,25
Характеристики формы зерна:			
$\varkappa'$	—	1,06	1,14
$\varkappa'\lambda'$	—	0,06	0,14
Скорость горения пороха u_1 . .	$\frac{дм/сек}{кг/дм^2}$	$7{,}40\cdot10^{-6}$	$7{,}50\cdot10^{-6}$

Температура взрывчатого превращения пороха принимается

для пироксилиновых порохов $T_1 = 2500° - 2800°$;
„ нитроглицериновых „ $T_1 = 3000° - 3500°$.

В таблицах проф. Н. Ф. Дроздова и таблицах АНИИ, изд. 1933 г., начальное давление форсирования считается равным

$$p_a = 300\ am = 30\,000\ кг/дм^2.$$

При интегрировании системы уравнений пиродинамики (29), (30) и (31) следует обратить внимание на то, что в начальной фазе движения снаряда имеется „особенная точка", которая легко усматривается из правильно рассчитанной диаграммы (рис. 14). В приложении 2 приводится пример численного интегрирования системы уравнений пиродинамики для случая $\Delta = 0{,}60$ и $B = 2{,}00$, представляемого этой диаграммой, с использованием формул квадратур, изложенных в § 5.

§ 4. ДВИЖЕНИЕ СНАРЯДА В КАНАЛЕ ОРУДИЯ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ГОРЕНИЯ ПОРОХОВОГО ЗАРЯДА. ТЕМПЕРАТУРА ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ. ТАБЛИЦЫ АНИИ, изд. 1933 г.

Конец горения пороха является началом периода расширения пороховых газов по закону политропы:

$$p = p_k \eta^{1+\Theta} \text{ при } \lambda > \lambda_k, \qquad (44)$$

где

$$\eta_1 = \frac{\lambda_1 + \lambda_k}{\lambda_1 + \lambda}, \tag{45}$$

а

$$p_k = f\Delta \frac{1 - 0{,}5\Theta B(1-\zeta_a)^2}{\lambda_1 + \lambda_k}. \tag{46}$$

На основании формулы (33) находим выражение квадрата удельной скорости в момент окончания горения пороха:

$$(v_y)_k^2 = Bfg\,(1-\zeta_a)^2, \tag{47}$$

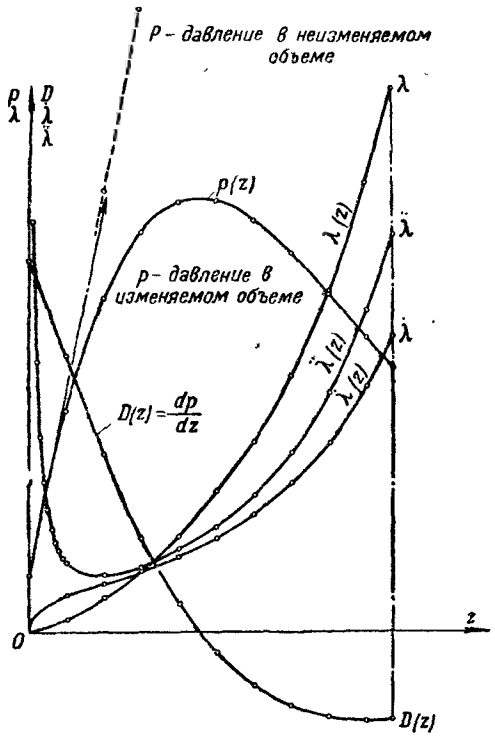


Рис. 14. Диаграмма к решению системы уравнений пиродинамики.

а затем при помощи формулы (44) находим и выражение для v_y^2 на участке расширения пороховых газов:

$$v_y^2 = Bfg(1-\zeta_a)^2 + 2\frac{g}{\Delta}\int_{\lambda_k}^{\lambda} p\,d\lambda =$$

$$= \frac{2}{\Theta} fg\left\{1 - \eta^{\Theta}\left[1 - 0{,}5\Theta B(1-\zeta_a)^2\right]\right\}. \tag{48}$$

Абсолютная температура при конце горения пороха определяется соотношением, вытекающим из формул (46) и (2):

$$\frac{T_k}{T_1} = 1 - 0{,}5\Theta B(1-\zeta_a)^2. \tag{49}$$

Очевидно, в период расширения пороховых газов

$$\frac{T}{T_k} = \frac{p}{p_k}\cdot\frac{\lambda_1+\lambda}{\lambda_1+\lambda_k} = \eta^\Theta.$$

Тогда на основании формул (48) и (49) получаем:

$$\frac{T}{T_1} = \eta^\Theta\,[1 - 0{,}5\Theta B(1-\zeta_a)^2] = 1 - \frac{\Theta}{f}\cdot\frac{v_y^2}{2g}. \tag{50}$$

Для определения абсолютной температуры в период горения пороха имеем формулу

$$\frac{T}{T_1} = 1 - \frac{\Theta}{f}\cdot\frac{v_y^2}{2g}. \tag{51}$$

Запас энергии пороха равен

$$E_1 = \frac{\omega c_{wm} T_1}{A} = \frac{\omega c_{wm} R T_1}{AR} = \frac{f\omega}{\Theta};$$

в момент прохождения снарядом пути λ живая сила абсолютного поступательного движения равна:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_y^2}{2}\nu_v^2 = \frac{\omega}{\varphi_a}\cdot\frac{v_y^2}{2g}.$$

Поэтому, вводя понятие *коэфициент использования* порохового заряда в произвольный момент времени, придем к формуле:

$$r = \frac{E}{E_1} = \frac{\Theta}{f\varphi_a}\cdot\frac{v_y^2}{2g} = \frac{\Theta}{f\omega}\cdot\frac{qv^2}{2g}, \tag{52}$$

где v — абсолютная скорость,
так что

$$\zeta_a r = \frac{\Theta}{f}\cdot\frac{v_y^2}{2g}.$$

Формулы внутренней балистики приведены здесь в их простейшем начертании, и расчеты, производимые по этим формулам, требуют наименьшего количества выкладок.

Вместе с тем формулы подобраны так, чтобы легко было проконтролировать любое решение. В частности, весьма полезны формулы (39) и (40). Так, формула (39) дает возможность рассчитать первый промежуток времени $(t_y)_1$ с высокой степенью точности при помощи формулы квадратур Эйлера, а формула (40) может быть использована при расчете того же промежутка

времени по методу проф. Бравина и в других случаях, например для построения касательной в начальной точке форсирования к кривой давлений $p(t)$, где эта касательная является общей для двух ветвей: воспламенения заряда и движения снаряда (см. рис. 12).

Более общие формулы для производной давления p по аргументу z или t_y применимы также для численного решения уравнений пиродинамики путем повышения порядка дифференциального уравнения до второго (см. приложение 2).

Остановимся теперь на возможности пользоваться существующими таблицами для решения задач внутренней балистики.

Например, при пользовании таблицами проф. Н. Ф. Дроздова для получения зависимости давления от времени требуются некоторые дополнительные вычисления, довольно трудоемкие. Однако по ним очень просто получить все главнейшие точки кривой давлений в аргументе пути и наивыгоднейшее балистическое решение.

Таблицы АНИИ, изд. 1933 г., по идее могли бы быть более универсальными, для всех случаев артиллерийской практики; однако они обладают весьма крупными недостатками, из-за которых пригодны лишь для построения ориентировочных кривых давлений и скоростей движения снаряда в аргументах пути и времени, и то при условии, что первый участок времен, заключающий грубую ошибку, будет исправлен каким-либо способом.

Таблицы АНИИ, изд. 1933 г., составлены для стандартного пороха, но опыт показал, что ими можно пользоваться и для приближенных расчетов стрелкового оружия.

В этих таблицах давления приведены в *кг/см*^{2}, или в технических атмосферах, а вместо величин скоростей и времен движения снаряда даны условные, или табличные, числа:

$v_{\text{табл}}$ — скорость в *м/сек*;

$t_{\text{табл}}$ — время в *сек/м*, увеличенное в 10^5 раз, причем величина l_1 — приведенная длина каморы — выражена в метрах.

В расчет $v_{\text{табл}}$ и $t_{\text{табл}}$ включен *коэфициент фиктивности* его средним значением $\varphi = 1{,}05$.

Поэтому величина $v_{\text{табл}}$ меньше v_y в отношении $1 : \sqrt{1{,}05}$; $t_{\text{табл}}$ больше t_y в отношении $\sqrt{1{,}05} : 10^{-5}$. Вследствие этого при решении балистических задач по таблицам АНИИ, изд. 1933 г., надо пользоваться следующими формулами, нумерация которых соответствует нумерации формул, приведенных выше, но со значком штрих:

$$v = v_{\text{табл}} \nu'_v; \qquad \nu'_v = \frac{1}{\chi} \sqrt{\frac{1{,}05\omega}{\varphi_r q}}; \tag{34'}$$

$$t = t_{\text{табл}} \nu'_t; \qquad \nu'_t = 10^{-5} l_1 \sqrt{\frac{\varphi_r q}{1{,}05\,\omega}} = 10^{-5} \frac{l_1}{\chi \nu'_v}; \tag{36'}$$

$$j_{\text{табл}} = \frac{dv_{\text{табл}}}{dt_{\text{табл}}} = \frac{g}{1{,}05\,\Delta}\,p = \frac{93{,}4}{\Delta}\,p \ \ м/сек^2; \tag{39'}$$

$$D_a' = \left(\frac{dp}{dt_{\text{табл}}}\right)_0 = \frac{N'_a}{\sqrt{B}} = 0{,}975\,\frac{N_a}{\sqrt{B}}; \tag{40'}$$

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_0 = \frac{D'_a}{\nu'_t}; \tag{43'}$$

$$v^2_{\text{табл}} = \frac{2}{\Theta}\cdot\frac{fg}{1{,}05}\left\{1 - \eta^{\Theta}\left[1 - 0{,}5\Theta B\,(1-\zeta_a)^2\right]\right\}; \tag{48'}$$

$$\frac{T}{T_1} = 1 - 1{,}05\,\frac{\Theta}{f}\cdot\frac{v^2_{\text{табл}}}{2g}; \tag{50'}$$

$$r = 1{,}05\,\frac{\Theta}{f\varphi_a}\cdot\frac{v^2_{\text{табл}}}{2g} = \frac{\Theta}{f\omega}\cdot\frac{qv^2}{2g}. \tag{52'}$$

§ 5. ПЕРЕСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ ОТ АРГУМЕНТА ПУТИ К АРГУМЕНТУ ВРЕМЕНИ. ФОРМУЛЫ КВАДРАТУР ЭЙЛЕРА и проф. Е. Л. БРАВИНА

Диаграммы давлений пороховых газов и вообще действующих усилий или нагрузок в функции времени необходимы при решении всех вопросов динамики и прочности сооружений. Расчеты артиллерийских конструкций в этом отношении требуют особого внимания, так как здесь по большей части берутся предельные нормы допускаемых напряжений, причем достигаемая этим экономия веса служит средством для повышения маневренности установок, скорострельности системы и увеличения коэфициента использования металла.

Иногда бывает удобно получить основное решение задачи в аргументе пути. Тогда это решение нужно уметь перестроить в аргумент времени.

Особо большое значение, как известно из теории колебаний, представляет промежуток времени t_m от момента вступления в действие нагрузки до ее максимума, который часто простирается от начальной фазы движения. Но в начале движения скорости изменяются от нуля до малых значений. При остановке движения скорости изменяются в обратном отношении, что делает невозможным применение для расчета времен формулы

$$t_1 = \int_0^{x_1} \frac{dx}{v}.$$

Ниже изложены два метода квадратур, которые позволят наиболее просто и точно перестраивать диаграммы в аргумент времени, а также могут быть полезны и в других случаях, например для определения объемов, координат центра тяжести и моментов инерции различных тел.

А. ФОРМУЛЫ КВАДРАТУР ЭЙЛЕРА

В курсах математического анализа приводится формула квадратур Эйлера:

$$\int_a^b f(x)\,dx = \frac{h}{2}[f(b)+f(a)] - \frac{h^2}{12}[\dot{f}(b)-\dot{f}(a)] + \\ + \frac{h^4}{720}[\dddot{f}(b)-\dddot{f}(a)] - \ldots \qquad (53)$$

Этой формулой выгодно пользоваться тогда, когда подинтегральная функция может быть аппроксимирована полиномом не выше третьей степени. При таких условиях в формуле (53) остаются только первые два члена.

Если подинтегральная функция будет более высокого порядка, то двучленная формула Эйлера даст приближенный результат с погрешностью, характеризуемой остаточным членом R:

$$\int_a^b f(x)\,dx = \frac{h}{2}[f(b)+f(a)] - \frac{h^2}{12}[\dot{f}(b)-\dot{f}(a)] + R,$$

где

$$R = \frac{h^5}{720} f^{IV}(\tau_1); \quad a < \tau_1 < b. \qquad (54)$$

Покажем, как применять формулу Эйлера к определению промежутков времен Δt. Для этого напишем приближенное равенство:

$$\Delta\lambda \approx \frac{v_{i+1}+v_i}{2}\Delta t - \frac{j_{i+1}-j_i}{12}\Delta t^2. \qquad (55)$$

Очевидно, Δt является одним из корней квадратного уравнения вида:

$$a\,\Delta t^2 + b\,\Delta t + c = 0,$$

и, следовательно, может быть найдено по формуле

$$\Delta t = \frac{-b - \sqrt{b^2-4ac}}{2a}, \qquad (56)$$

где

$$a = \frac{1}{12}(j_{i+1}-j_i);$$

$$b = -\frac{1}{2}(v_{i+1}+v_i);$$

$$c = \Delta\lambda.$$

Пример. Рассчитать первый промежуток времени для некоторой задачи пиродинамики при следующих данных:

$$p_a = 300 \ am; \qquad (v_y)_0 = 0 \ м/сек;$$
$$p_1 = 1162 \ am; \qquad (v_y)_1 = 136{,}7 \ м/сек;$$
$$\Delta = 0{,}60 \ кг/дм^3; \qquad \lambda_1 = 0{,}069.$$

$$a = \frac{1}{12} \cdot \frac{g}{\Delta} (p_1 - p_a) = \frac{1}{12} \cdot \frac{98{,}1}{0{,}60} 862 = 11\,740;$$

$$b = -\frac{1}{2}(v_{i+1} + v_i) = -68{,}35; \quad c = 0{,}069.$$

Искомое время

$$t_1 = \frac{68{,}35 - 37{,}78}{23480} = 130 \cdot 10^{-5}.$$

Интересно отметить, что при сохранении одного члена в формуле (53) получается известная формула трапеций:

$$\int_a^b f(x)\,dx = \frac{h}{2}\,[f(b) + f(a)].$$

Эта формула, как легко видеть, дала бы весьма неточный результат, а именно:

$$t_1 = -\frac{c}{b} = \frac{0{,}069}{68{,}35} = 101 \cdot 10^{-5},$$

т. е. с ошибкой почти в 30%.

Б. ФОРМУЛЫ КВАДРАТУР проф. Е. Л. БРАВИНА

Метод проф. Е. Л. Бравина в основном строится на отношениях значений аппроксимирующего полинома и его производных различного порядка на границах рассматриваемого промежутка интегрирования.

Общая формула квадратур для простого интеграла пишется в виде:

$$\int_a^b f(x)\,dx = \left\{ f(a) + \vartheta(n, m, s, p...) \frac{f(b) - f(a)}{2} \right\} h, \qquad (57)$$

где $h = b - a$ — промежуток интегрирования;

$\vartheta(n, m...)$ — модуль функции $\dot{f}(x) = \dfrac{df}{dx} \approx \varphi(x)$, т. е. модуль производной от подинтегральной функции, аппроксимируемой полиномом $\varphi(x)$.

Значение модуля $\vartheta(n, m...)$ того или иного приближения определяется по приводимым ниже формулам в зависимости от параметров n, m, s, p..., которые равны отношениям значений производных от подинтегральной функции различного порядка на границах промежутка h.

Для записи значений параметров в этом методе целесообразно ввести сокращенное обозначение слова ratio (по-латински — отношение) в виде символа rat, который читается, как полное слово ratio, подобно обозначению sin — синуса и т. п.

При таком обозначении отношений можно выразить параметры n, m... формулами:

$$\left.\begin{aligned} n &= \operatorname{rat}\,[\dot{f}(x)]_a^b = \dot{f}(b) : \dot{f}(a); \\ m &= \operatorname{rat}\,[\ddot{f}(x)]_a^b = \ddot{f}(b) : \ddot{f}(a) \text{ и т. д.} \end{aligned}\right\} \tag{58}$$

Заметим, что некоторые виды квадратур проще вычислять с помощью модуля $\theta(\nu, \mu, \sigma, \pi...)$, зависящего от *обращенных параметров*:

$$\left.\begin{aligned} \nu &= \frac{1}{n} = \operatorname{rat}\,[\dot{f}(x)]_b^a = \dot{f}(a) : \dot{f}(b); \\ \mu &= \frac{1}{m} = \operatorname{rat}\,[\ddot{f}(x)]_b^a = \ddot{f}(a) : \ddot{f}(b) \text{ и т. д.} \end{aligned}\right\} \tag{59}$$

Оказывается, что модули $\vartheta(n, m...)$ и $\theta(\nu, \mu...)$ легко выражаются при помощи параметров n, m... или ν, μ... так:

$$\left.\begin{aligned} \vartheta(n, m) &= 1 - k(n, m) = 1 + \varkappa(\nu, \mu); \\ \theta(\nu, \mu) &= 1 - \varkappa(\nu, \mu) = 1 + k(n, m). \end{aligned}\right\} \tag{60}$$

Следовательно, для определения величины модуля достаточно вычислить значение лишь вспомогательной функции $k(n, m)$ или $\varkappa(\nu, \mu)$ по формулам:

при одном параметре

$$k(n) = \frac{1}{3} \cdot \frac{n-1}{n+1} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{\nu - 1}{\nu + 1} = -\varkappa(\nu); \tag{61}$$

при двух параметрах

$$k(n, m) = \frac{1}{2} \cdot \frac{(n-1)(m+1)}{m(n+2) + (2n+1)} =$$

$$= -\frac{1}{2} \cdot \frac{(\nu - 1)(\mu + 1)}{\mu(\nu + 2) + (2\nu + 1)} = -\varkappa(\nu, \mu). \tag{62}$$

Эти вспомогательные функции будем называть *вариациями модуля*.

Другие, более сложные, общие выражения для вариаций модуля о трех параметрах и выше здесь не приводятся, так как на практике ими не пользуются, кроме некоторых частных

случаев, когда один из параметров равен нулю или бесконечности.

Значения вариаций модуля можно брать также непосредственно из таблиц приложения 3.

Для определения промежутка времени Δt на любом участке по методу проф. Бравина напишем квадратуру пути:

$$\Delta\lambda = \int_{t_i}^{t_i+1} v_y\, dt_y = \left[v_i + \vartheta(n, m)\frac{\Delta v}{2}\right]\Delta t. \tag{63}$$

Решая это линейное уравнение относительно Δt, найдем:

$$\Delta t = \frac{\Delta\lambda}{v_i + \vartheta(n, m)\dfrac{\Delta v}{2}}. \tag{64}$$

Пример. Решим предыдущую задачу этим методом при следующих данных:

$$\lambda_1 = 0{,}069; \quad p_1 = 1162; \quad D_1 = 10{,}16;$$
$$v_1 = 136{,}7; \quad p_a = 300; \quad D_a = 3{,}54;$$
$$n = 3{,}872; \quad m = 2{,}870.$$

По таблицам приложения 3 находим:

$$\vartheta(n, m) = 1 - k(n, m) = 1 - 0{,}216 = 0{,}784.$$

Отсюда

$$t_1 = \frac{2\lambda_1}{\vartheta(n, m)\cdot v_1} = \frac{0{,}1380}{0{,}784\cdot 136{,}7} \approx 129\cdot 10^{-5}. \tag{65}$$

Этот пример показывает, что формула проф. Бравина с модулем $\vartheta(n, m)$ о двух параметрах дает результаты, почти эквивалентные формуле Эйлера, но для этого необходимо располагать значениями производных $D = \dfrac{dp}{dt}$ на границах рассматриваемого участка. Правда, начальное значение D_a в момент форсирования желательно иметь при всех обстоятельствах для правильного построения диаграммы давлений. Что же касается величины D_1 в первой точке, то ее можно рассчитать более грубо по формуле с модулем первой степени, например:

$$D_1 = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{\Delta\lambda}\cdot\frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{\Delta\lambda}\left[v_1 + \vartheta_1(n)\frac{\Delta v}{2}\right] =$$

$$= \frac{598}{0{,}1145}\left[136{,}7 + 0{,}930\cdot 68{,}3\right] = 10{,}45. \tag{66}$$

Однако при рассмотрении формул (64) и (65) легко притти к такому заключению, что при расчете промежутков времени Δt по методу проф. Бравина далеко не всегда необходимо пользоваться модулем о двух параметрах, а только лишь при расчете первого промежутка вблизи особенной точки, соответствующей началу движения, когда в формуле (64) скорость

$v_i = 0$. В этом случае получается формула (65), точность которой зависит исключительно от значения модуля.

На остальных же участках движения наличие величины v_i в знаменателе формулы (64) повышает относительную точность результата, а потому дальнейшие расчеты можно делать с помощью модуля первой степени:

$$\vartheta(n) = 1 - k(n) = \frac{2}{3} \cdot \frac{n+2}{n+1}; \tag{67}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta\lambda}{v_i + \vartheta(n)\dfrac{\Delta v}{2}}. \tag{68}$$

По этой формуле для первого участка получили бы значение $t_1 = 126 \cdot 10^{-5}$, т. е. с погрешностью около 3%.

Для подинтегральной функции $f(x)$ порядка не выше третьего точность формулы проф. Бравина с одним параметром характеризуется остаточным членом

$$R = -\frac{h^4}{72} \cdot \frac{n-1}{n+1} \dddot{f}(a). \tag{69}$$

Отсюда видно, что при одном параметре n точность формулы проф. Бравина ниже точности двучленной формулы Эйлера. Принятие во внимание второго высшего параметра m вообще увеличивает точность метода. Кроме того, из выражения остаточного члена (69) видно, что точность метода будет выше, если функция $j(x) = \dot{f}(x)$, т. е. производная от подинтегральной функции, окажется знакопостоянной, будучи в то же время однозначной, конечной, непрерывной и монотонной, потому что тогда

$$n = \operatorname{rat}[\dot{f}(x)]_a^b > 0$$

и дробь

$$\left|\frac{n-1}{n+1}\right| < 1.$$

Для того чтобы составить также и геометрическое представление о точности данного метода, рассмотрим способ составления интерполирующего полинома $\varphi(x)$ и представим его графически.

На основании формулы (57) можно написать два тождественных равенства:

1) точное

$$\vartheta(n, m, s, p\ldots)\frac{h}{2}[f(b) - f(a)] = \int_a^b [f(x) - f(a)]\,dx =$$

$$= \int_a^b \int_a^x j(x)\,dx\,dx;$$

2) приближенное

$$\vartheta(n, m)\frac{h}{2}[f(b)-f(a)]=\int_a^b\int_a^x \varphi(x)\,dx\,dx.$$

Отсюда видно, что погрешность в определении модуля оценивается разностью двукратных интегралов:

$$\int_a^b\int_a^x j(x)\,dx\,dx-\int_a^b\int_a^x \varphi(x)\,dx\,dx=\int_a^b\int_a^x [j(x)-\varphi(x)]\,dx\,dx,$$

т. е. разностью моментов относительно верхнего предела площадей, покрываемых кривыми $j(x)$ и $\varphi(x)$, или, иначе говоря,

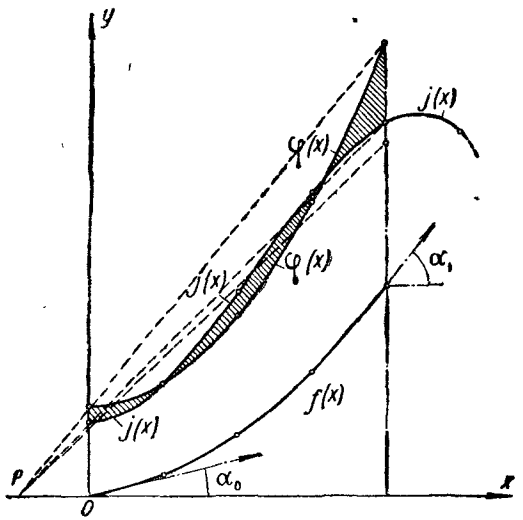


Рис. 15. Кривые заданной функции $f(x)$, ее производной $j(x)$ и интерполирующего полинома $\varphi(x)$.

моментом положительных и отрицательных площадок, заключенных между кривыми $j(x)$ и $\varphi(x)$, причем для этих кривых справедливо равенство площадей

$$f(b)-f(a)=\int_a^b j(x)\,dx=\int_a^b \varphi(x)\,dx$$

и соотношений

$$n=\operatorname{rat}[\dot{f}(x)]_a^b=\operatorname{rat}[\varphi(x)]_a^b;$$

$$m=\operatorname{rat}[\ddot{f}(x)]_a^b=\operatorname{rat}[\dot{\varphi}(x)]_a^b \text{ и т. д.,}$$

что прекрасно иллюстрируется диаграммой рис. 15.

Вследствие того что в методе проф. Бравина все свойства функции концентрируются в величине модуля, как в фокусе, получаем квадратуру (57), всегда линейно зависящую от приращения аргумента $h = b - a$, для Δt — линейное уравнение (64) и для t_1 — уравнение (65), что представляет, несомненно, бо́льшие удобства по сравнению с методом Эйлера.

Для исправления начального участка времен в таблицах АНИИ, изд. 1933 г., лучше всего пользоваться формулой проф. Бравина, вытекающей из очевидных преобразований формулы (65) с помощью формулы (67) при табличном значении $\lambda_1 = 0{,}1$ и условном увеличении чисел времен в 10^5 раз:

$$(t_{\text{табл}})_1 = \frac{30000}{(v_{\text{табл}})_1} \cdot \frac{p_1 + 300}{p_1 + 600},$$

а не формулой с двумя параметрами и не формулой Эйлера, которые дадут преувеличенные значения $(t_{\text{табл}})_1$, так как сами значения $(v_{\text{табл}})_1$ и p_1 в таблицах АНИИ, изд. 1933 г., неверны.

На основании изложенного можно рекомендовать:

а) начальные участки с особенными точками рассчитывать по формуле Эйлера, например:

$$\Delta\lambda = \left[v_1 - \frac{\Delta t}{6}(j_1 - j_a)\right]\frac{\Delta t}{2}; \tag{70}$$

б) начальный промежуток времени Δt определять по формуле (56), т. е. как корень квадратного уравнения (55); при малых начальных участках можно пользоваться формулой (68) проф. Бравина;

в) на последующих участках приращения пути $\Delta\lambda$ рассчитывать либо по формуле (55) Эйлера, либо методом проф. Бравина по формуле:

$$\Delta\lambda = \left[v_i + \vartheta(n)\frac{\Delta v}{2}\right]\Delta t; \tag{71}$$

г) приращение времени Δt на последующих участках вычислять по формуле (68) проф. Бравина.

Само собой разумеется, что указанные выше обе формулы квадратур могут быть положены в основу численных методов интегрирования дифференциальных уравнений.

§ 6. ВЫБОР НАИВЫГОДНЕЙШЕГО БАЛИСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Тактико-технические требования, вытекающие из условий боевого применения вооружения самолетов, позволяют установить: дистанцию боя, вес снаряда q и энергию его поступательного движения у цели $E_c = \frac{qv_c^2}{2g}$.

Исходя из этих данных, на основании законов внешней баллистики подбирают наилучшую форму снаряда, назначают калибр d и определяют начальную, или же дульную, скорость снаряда v_0.

Теперь можно составить выражение для дульной энергии поступательного движения снаряда:

$$E_0 = \frac{qv_0^2}{2g}.$$

Веса подобных снарядов относятся, как кубы калибров; поэтому в качестве характеристики веса снаряда вычисляют так называемый *коэфициент относительного веса*:

$$c_q = \frac{q}{d^3} \text{ кг/дм}^3 \text{ (или г/см}^3\text{)}.$$

Отношение дульной энергии к кубу калибра называют *коэфициентом могущества орудия*

$$C_E = \frac{E_0}{d^3} = c_q \frac{v_0^2}{2g}.$$

По заданной дульной энергии E_0 требуется подобрать: вес заряда ω, плотность заряжания Δ, длину нарезной части канала L_0 и полную длину орудия L при максимально допустимом значении давления p_{max}.

Для веса заряда считают нормой 8—9 *г* пороха на тонно-метр дульной энергии, т. е.

$$\omega = (8 \div 9 \text{ г}) E_0 \text{ тм}. \qquad (72)$$

Плотность заряжания Δ и величина p_{max} в обычных случаях колеблются в довольно узких пределах:

$$\Delta = 0{,}60 \div 0{,}80;$$

$$p_{max} = 3000 \div 3500 \text{ ат}.$$

Задаваясь ориентировочно несколькими различными значениями ω, для каждого из них выполним серию расчетов при нескольких значениях p_{max}. Каждую серию разобьем еще на несколько значений Δ.

Из всех расчетов можно будет выбрать наиболее удачное решение для любого случая.

Расчет выполняют в следующем порядке.

1. Зная калибр d, вес заряда ω и вес снаряда q, задаются значением χ и определяют коэфициент фиктивности

$$\varphi_r = \frac{1 + \nabla}{\chi} k_b.$$

Для стрелкового оружия можно принимать $\chi = 1$.

2. Находят переходный коэфициент ν_v по формуле (35) и затем

$$(v_y)_0 = \frac{v_0}{\nu_v}.$$

3. Вводя обозначение τ_0 для относительной температуры пороховых газов в момент прохождения снарядом дульного среза, находят ее по формуле (50):

$$\tau_0 = \frac{T_0}{T_1} = 1 - \frac{\Theta}{f} \cdot \frac{(v_y)_0^2}{2g} = \eta_0^{\Theta} \cdot \frac{T_k}{T_1} = \eta_0^{\Theta} \tau_k,$$

имея в виду, что будет соблюдено условие $\lambda_k < \lambda_0$.

4. Заменяя η_0 его выражением (45), решают уравнение

$$\tau_0 = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_k}{\lambda_1 + \lambda_0}\right)^{\Theta} \cdot \tau_k,$$

где $\lambda_1 = 1 - \alpha\Delta$, или относительно λ_0:

$$\lambda_0 = \left(\frac{\tau_k}{\tau_0}\right)^{\frac{1}{\Theta}} (\lambda_1 + \lambda_k) - \lambda_1. \qquad (73)$$

Значение λ_0 отыскивают при помощи логарифмов, причем $\lg \tau_0$ находят по значению τ_0, а

$$\lg \tau_k = \lg \frac{T_k}{T_1} = \lg [1 - 0{,}5\Theta B (1 - \zeta_a)^2]$$

берут из таблиц проф. Н. Ф. Дроздова, определив предварительно B по данным Δ и p_{max}.

Величину λ_0 рассчитывают по следующей форме:

Δ	B	λ_k	$\lambda_1 = 1 - \alpha\Delta$	$\lg \tau_k$	$\lg \frac{\tau_k}{\tau_0}$	$\lg \left(\frac{\tau_k}{\tau_0}\right)^{\frac{1}{\Theta}}$	$\lambda_k + \lambda_1$	$\lambda_0 + \lambda_1$*	λ_0

* При вычислении предпоследней графы $\lambda_0 + \lambda_1 = \left(\frac{\tau_k}{\tau_0}\right)^{\frac{1}{\Theta}} (\lambda_k + \lambda_1)$ движок логарифмической линейки ставить против значения $\lg \left(\frac{\tau_k}{\tau_0}\right)^{\frac{1}{\Theta}}$.

5. Получив относительную длину λ_0 пути снаряда в долях приведенной длины каморы

$$l_1 = \frac{w_a}{S_0} = \frac{\omega}{S_0 \Delta},$$

прибавляют к λ_0 величину относительной длины каморы, выраженную в долях l_1, имея в виду, что камора по большей части имеет бутылочную форму.

Называя *степенью бутылочности* ε_1 отношение приведенной длины l_1 к фактической длине l_a каморы

$$\varepsilon_1 = \frac{l_1}{l_a},$$

получают:

$$\frac{l_a}{l_1} = \frac{1}{\varepsilon_1}.$$

Таким образом, удельная длина орудия в долях l_1 определится выражением:

$$\frac{L}{l_1} = \lambda_0 + \frac{1}{\varepsilon_1}.$$

Выражая длины L и l_a в калибрах d, получим формулы:

$$\frac{L}{d} = \frac{l_1}{d}\left(\lambda_0 + \frac{1}{\varepsilon_1}\right) = \frac{\omega}{S_0 d}\cdot\frac{\lambda_0 + \frac{1}{\varepsilon_1}}{\Delta}; \tag{74}$$

$$\frac{l_a}{d} = \frac{l_1}{d}\cdot\frac{1}{\varepsilon_1} = \frac{\omega}{S_0 d}\cdot\frac{1}{\varepsilon_1\Delta}. \tag{75}$$

Степенью бутылочности ε_1 можно задаваться произвольно, хотя, например, по исследованиям В. Е. Слухоцкого, для полевых орудий существуют известные нормы, которые можно представить формулой

$$\varepsilon_1 \approx 1{,}02 + 0{,}0001\left(\frac{L}{d}\right)^2.$$

Пример. Покажем применение этого способа балистического расчета орудия при следующих данных: калибр $d = 20$ *мм*; вес снаряда $q = 120$ *г*; дульная скорость $v_0 = 1000$ *см/сек*; площадь сечения канала с учетом нарезов $S_0 = 3{,}2$ *см*^{2}; степень бутылочности $\varepsilon_1 = 2$; $1 : \varepsilon_1 = 0{,}50$; коэфициент взаимодействия масс $\chi = 1$.

Дульная энергия

$$E_0 = \frac{qv_0^2}{2g} = 6{,}12 \text{ } тм.$$

Вес заряда

$$\omega = (8 \div 9 \text{ } г)\, 6{,}12 = 50 \div 55 \text{ } г.$$

Произведем расчет для двух случаев, по пять вариантов в каждом, от $\Delta = 0{,}60$ до $\Delta = 0{,}80$, через 0,05.

Первый случай: $\omega = 50$ *г*; $p_{max} = 3000$ *ат*; $\dfrac{\omega}{S_0 d} = 7{,}81$.

Второй случай: $\omega = 50$ *г*; $p_{max} = 3500$ *ат*; $\dfrac{\omega}{S_0 d} = 7{,}81$.

Для 20-*мм* снаряда с ведущим пояском принимаем в первом и во втором случаях:

$$1+\nabla=1{,}03;$$

$$(v_y)_0=\frac{v_0}{\nu_v}=1676;$$

$$\varphi_r=\frac{1+\nabla}{\chi}k_b=1{,}17;$$

$$\tau_0=1-\frac{\Theta}{f}\cdot\frac{(v_y)_0^2}{2g}=0{,}699;$$

$$\nu_v=\frac{1}{\chi}\sqrt{\frac{\omega}{\varphi_r q}}=0{,}597;$$

$$\lg\tau_0=\bar{1}{,}8445.$$

По указанной выше схеме определяем значение λ_0 и результаты вписываем в новую таблицу, в которой ведем дальнейшие вычисления.

Таблица 2

$\omega=50$ *г*; $p_{max}=3000$ *ат*

№ по пор.	Δ	λ_0	$\lambda_0+\frac{1}{\varepsilon_1}$	$\frac{\lambda_0+\frac{1}{\varepsilon_1}}{\Delta}$	$\frac{L}{d}$	$\frac{1}{\varepsilon_1\Delta}$	$\frac{l_a}{d}$	$\eta_k=\frac{\lambda_k}{\lambda_0}$
1	0,60	5,07	5,57	9,29	72,5	0,833	6,50	0,3[illegible]
2	0,65	5,39	5,89	9,06	70,8	0,770	6,00	0,36
3	0,70	5,77	6,27	8,95	69,9	0,715	5,58	0,43
4	0,75	6,29	6,79	9,05	70,7	0,667	5,21	0,51
5	0,80	7,16	7,66	9,58	74,8	0,625	4,88	0,65

Подобную же таблицу рассчитываем для $\omega=50$ *г* и $p_{max}=3500$ *ат*.

Таблица 3

№ по пор.	Δ	λ_0	$\lambda_0+\frac{1}{\varepsilon_1}$	$\frac{\lambda_0+\frac{1}{\varepsilon_1}}{\Delta}$	$\frac{L}{d}$	$\frac{1}{\varepsilon_1\Delta}$	$\frac{l_a}{d}$	$\eta_k=\frac{\lambda_k}{\lambda_0}$
1	0,60	4,45	4,95	8,25	64,5	0,833	6,50	0,250
2	0,65	4,69	5,19	7,99	62,4	0,770	6,00	0,300
3	0,70	4,93	5,43	7,75	60,5	0,715	5,58	0,350
4	0,75	5,24	5,74	7,65	59,8	0,667	5,21	0,380
5	0,80	5,79	6,29	7,86	61,4	0,625	4,88	0,519

На рис. 16 представлена диаграмма L/d при $p_{max} = 3000$ *am*, рассчитанная для различных значений ω и Δ. Из нее усматривается, что кривые L/d имеют минимум вблизи значений $\Delta \approx 0{,}70$. При более высоком значении $p_{max} = 3500$ *am* этот минимум смещается в сторону повышенных значений $\Delta \approx 0{,}75$.

Балистический расчет орудия приводит к следующим выводам.

1. Общая длина ствола L уменьшается при увеличении веса заряда ω, но только до некоторого предела, после чего она начинает увеличиваться; подобное же влияние оказывает увеличение плотности заряжания, как это отмечено выше.

2. Общая длина ствола уменьшается вместе с повышением давления p_{max}; однако при повышении давления: а) снижается живучесть орудия; б) не получается никаких выгод в отношении длины каморы; в) уменьшается значение характеристики η_k, что способствует уменьшению рассеивания.

3. Длина каморы l_a резко уменьшается с возрастанием Δ.

4. Длина каморы уменьшается с увеличением степени бутылочности ε_1. Это обстоятельство заставляет при проектировании автоматического оружия брать значения ε_1 выше норм, выработанных для полевых систем.

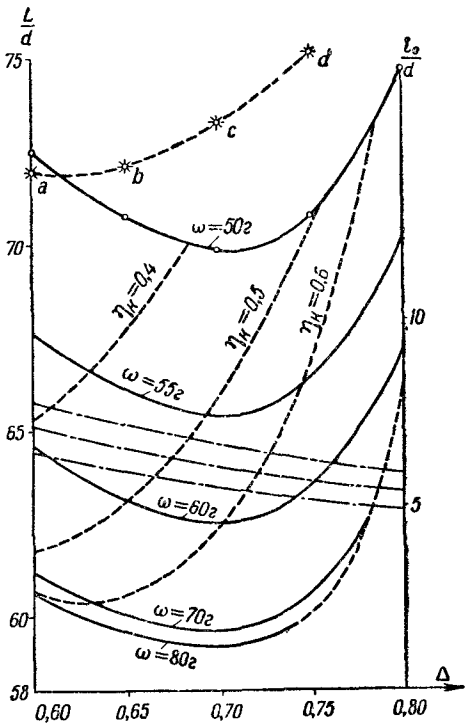


Рис. 16. Диаграмма изменения длин орудия и каморы в функции плотности заряжания и веса заряда.

5. Длина каморы увеличивается с повышением веса заряда ω при одном и том же калибре орудия d, а также при равных значениях ε_1 и Δ, что видно из формулы (75).

Поэтому в автоматическом оружии выгодно повышать значение Δ до предела 0,80, увеличивать ε_1 и уменьшать ω для достижения большей скорострельности благодаря укорочению гильзы и патрона. При этом укорочение гильзы улучшает ее экстрактирование и повышает надежность работы автоматики.

Если бы имелись полные правильно рассчитанные балистические таблицы, то по ним можно было бы находить значения λ_0, соответствующие значениям удельной скорости $(v_y)_0$.

Таблицы же АНИИ, изд. 1933 г., для этой цели не могут быть использованы, так как они вычислены неверно и, например, при $\omega = 50\ г$, $p_{max} = 3000\ am$ дают решение, весьма далекое от истинного. Оно показано пунктирной кривой *abcd* на рис. 16.

§ 7. МЕТОД СОСТАВЛЕНИЯ БАЛИСТИЧЕСКИХ СБОРНИКОВ проф. Б. Н. ОКУНЕВА

Метод проф. Б. Н. Окунева является дальнейшим крупным шагом вперед в вопросе составления балистических сборников для решения основной задачи внутренней балистики.

Сущность его заключается в том, что все уравнения внутренней балистики пишутся в безразмерных единицах и аргументы составляются так, что таблицы пригодны для любых порохов, т. е. они становятся более универсальными.

Это достигается исключением из уравнений не только чисто механических величин χ, φ_r, ω и q, но и физических факторов, например: f — сила пороха и p_a — давление форсирования; коэфициент расширения $k = 1 + \Theta$ при этом не исключается.

Чтобы яснее выявить особенности метода проф. Б. Н. Окунева, выведем его формулы непосредственно из приведенных выше формул, отвечающих методу проф. Дроздова.

Проф. Б. Н. Окунев рассматривает величины полных импульсов давления от момента воспламенения заряда, что в принятых нами обозначениях напишется так:

$$I = \int_0^t p\,dt = \frac{e_1}{u_1}\zeta;$$

$$I_k = \frac{e_1}{u_1}\zeta_k = \frac{e_1}{u_1} = \frac{1}{S_0}\sqrt{Bf\omega\varphi_r m} = \nu_t \Delta \sqrt{\frac{Bf}{g}} = \nu_t I_{yk}.$$

Отсюда безразмерная величина относительного импульса $\frac{I}{I_k} = \zeta$, или z^* в обозначениях проф. Б. Н. Окунева, что представляет несколько в ином физическом толковании величину ζ — относительной толщины сгоревшего слоя зерна.

Примечание. Некоторые обозначения проф. Б. Н. Окунева совпадают с нашими обозначениями, но имеют иной смысл. У всех таких букв будем ставить звездочку *, например $z^* \neq z$, а равно ζ в наших обозначениях.

Далее вводятся понятия о некоторых характеристических величинах, не зависящих от процесса горения пороха; при помощи этих величин и исключаются физические факторы из формул. Эти величины можно выражать и вычислять двояким образом, поскольку они входят в окончательные параметры в виде отношений к ним других величин той же размерности. В таблице 4 эти величины представлены различными формулами.

Формулы, относящиеся к методу проф. Б. Н. Окунева

Наименование величин	В обозначениях проф. Б. Н. Окунева	В наших обозначениях
Вспомогательные величины		
Предельная скорость	$V=\sqrt{\frac{2gf\omega}{(k-1)\gamma q}}$	$V_y=\sqrt{\frac{2}{\Theta}fg}$
Полное пиростатическое давление	$P=\frac{f\omega}{sl_1^*}$	$P_y=\frac{f\Delta}{\lambda_1}$
Характеристическое время	$T=\frac{\varphi q}{gs}\cdot\frac{V}{P}$	$T_y=\frac{\Delta}{g}\cdot\frac{V_y}{P_y}$
Характеристический путь	$L^*=\frac{\varphi q}{2gs}\cdot\frac{V^2}{P}$	$L_y=\frac{\lambda_1}{\Theta}$
Искомые величины		
Относительная скорость	$\nu=\frac{v}{V}$	$\nu=\frac{v_y}{V_y}$
Относительное давление [1]	$\rho=\frac{p}{P}$	$\rho=\frac{p}{P_y}$
Относительное время	$\tau=\frac{t}{T}$	$\tau=\frac{t_y}{T_y}$
Относительный путь	$\lambda^*=\frac{l}{L^*}$	$\lambda^*=\frac{\lambda}{L_y}$
Параметры		
Относительный характеристический импульс	$R=\sqrt{\frac{2\varphi qf\omega}{(k-1)gs^2I_k^2}}$	$R=\sqrt{\frac{2}{\Theta B}}$
Параметр расширения	$k=\frac{c_{pm}}{c_{wm}}$	$k=1+\vartheta$
Параметр заряжания	$\Lambda_\Delta=\frac{l_\Delta}{l_1^*}$	$\Lambda_\Delta=\frac{\lambda_\Delta}{\lambda_1}$
Параметр форсирования	$z_0^*=f(\psi_0)$	$z_0^*=\zeta_a=f(\psi_a)$

Параметр расширения проф. Б. Н. Окунев принимает, как и проф. Н. Ф. Дроздов, равным $k=1{,}20$. Таким образом, в этом методе остаются по существу три параметра: R, Λ_Δ и z_0^*, в зависимости от которых могут быть определены искомые величины. Важнейшие из этих параметров R и Λ_Δ составляются совершенно оригинальным образом, хотя и имеют определенную связь с параметрами Θ, B, λ_Δ и λ_1, отвечающими методу проф. Н. Ф. Дроздова, что видно из таблицы 4.

[1] Или относительное ускорение, что в данном методе одно и то же.

Введем в формулу (33) обозначения из правой графы таблицы:

$$v_y = z\sqrt{Bfg} = (\zeta - \zeta_a)\frac{V_y}{R}. \tag{76}$$

Отсюда

$$z = \zeta - \zeta_a = \nu R = z^* - z_0^*; \tag{77}$$

$$dz = R\,d\nu = dz^*. \tag{78}$$

Хотя из формулы (78) усматривается, что величины dz и $d\nu$ связаны между собой множителем пропорциональности R, однако в способе проф. Н. Ф. Дроздова символ z есть аргумент и $v_y = f(z)$. В способе же проф. Б. Н. Окунева в качестве аргумента принимается ν, а $z^* = \zeta$ является функцией $f(\nu)$.

Используя уравнения (77), (31), (30), (29) и (39), а также отношения λ_ψ и λ к λ_1, найдем связь между параметрами и искомыми величинами, выражаемую следующей системой уравнений.

Пиродинамический период

$$z^* = z_0^* + \nu R; \qquad \Lambda_\psi = \Lambda_\Delta - \psi(\Lambda_\Delta - 1);$$

$$\psi = \varkappa' z^* - \varkappa'\lambda' z^{*2}; \qquad \rho = \frac{\psi - \nu^2}{\Lambda_\psi + \Lambda},$$

где $\Lambda = \dfrac{\lambda}{\lambda_1}$;

$$\frac{d\Lambda}{d\nu} = \frac{2}{\Theta}\cdot\frac{\nu}{\rho};$$

$$\frac{d\tau}{d\nu} = \frac{1}{\rho}. \tag{79}$$

Эта система уравнений в математическом отношении тождественна системе уравнений в методе проф. Н. Ф. Дроздова, составленных для аргумента z. При решении по формуле (79) необходимо учитывать все ранее сделанные указания [см. следствие, вытекающее из формулы (39)].

Период расширения

Преобразуя формулы (47) и (48), находим:

$$0{,}5\,\Theta B(1 - \zeta_a)^2 = \nu_k^2;$$

$$\eta^\Theta = \frac{1 - \nu^2}{1 - \nu_k^2} = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_k}{\lambda_1 + \lambda}\right)^\Theta = \left(\frac{1 + \Lambda_k}{1 + \Lambda}\right)^\Theta.$$

Отсюда

$$1 + \Lambda = (1 + \Lambda_k)(1 - \nu_k^2)^{\frac{1}{\Theta}}(1 - \nu^2)^{-\frac{1}{\Theta}} =$$

$$= \frac{1}{M_k}(1 - \nu^2)^{-\frac{1}{\Theta}} = \frac{\Gamma(\nu)}{M_k}, \tag{80}$$

где величина

$$M_k = \frac{1}{(1+\Lambda_k)(1-\nu_k^2)^{\frac{1}{\Theta}}}.$$

Далее

$$\rho_k = \frac{1-\nu_k^2}{1+\Lambda_k};$$

$$\rho = \rho_k \eta^{1+\Theta} = \frac{1-\nu^2}{1+\Lambda} = M_k (1-\nu^2)^{\frac{1+\Theta}{\Theta}} = M_k P(\nu). \qquad (81)$$

Наконец,

$$\tau = \tau_k + \int_{\nu_k}^{\nu} \frac{d\nu}{\rho} = \tau_k + \frac{1}{M_k} \int_{\nu_k}^{\nu} (1-\nu^2)^{-\frac{1+\Theta}{\Theta}} d\nu =$$

$$= \tau_k + \frac{\Theta(\nu) - \Theta(\nu_k)}{M_k}. \qquad (82)$$

Величина M_k есть параметр периода расширения и дается в таблицах. Точно так же в таблицах даются значения функций $\Gamma(\nu)$, $P(\nu)$ и $\Theta(\nu)$.

Глава II

КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

§ 8. ОБЩИЕ ОСНОВАНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ

Автоматическим называется такое оружие, у которого основные механизмы — перезаряжания и производства выстрела — действуют за счет энергии пороховых газов.

Работа автоматики такого оружия за время между двумя выстрелами складывается из следующего ряда последовательных или параллельных процессов: открывание затвора, экстрактирование гильзы, подача в приемник патрона из магазина или ленты, досылка в патронник очередного патрона, закрывание затвора, действие спускового и ударного механизмов.

По степени использования энергии пороховых газов для автоматической работы всех механизмов перезаряжания и производства выстрела или только части их различают следующие виды автоматического оружия:

Автоматическое оружие самострельное, у которого автоматически действуют все механизмы перезаряжания и очередного выстрела. На долю стрелка остается: прицеливаться, нажимать на спусковой механизм по времени столько, сколько необходимо для желаемой очереди огня, и заменять магазин или ленту по израсходовании патронов.

Автоматическое оружие самозарядное, в котором действие пороховых газов обеспечивает только перезаряжание и взведение ударного механизма. Для производства каждого выстрела стрелку необходимо всякий раз воздействовать на спусковой механизм.

Частично автоматизированное оружие, в котором действием пороховых газов автоматизирована только часть работ перезаряжания и производства выстрела.

Первый вид оружия является основным для всех типов пулеметов и автоматических малокалиберных пушек, т. е. для оружия, боевое применение которого требует скорострельности и „несбиваемости" прицельной линии при стрельбе, что обеспечивается наличием лафетов (станков и установок).

Второй вид оружия широко представлен системами пистолетов и автоматических винтовок (самозарядных). Это объясняется тем, что ввиду отсутствия специальных установок

одиночный огонь более эффективен, так как при автоматической стрельбе, вследствие отдачи, „сбивается" прицельная линия, и в очереди только первые пули бывают поражающими.

Конструктивно разница между первым и вторым видами оружия заключается лишь в устройстве спускового механизма. Как правило, в самозарядном оружии спусковой механизм более сложен. Имеется ряд систем автоматических винтовок, пулеметов и малокалиберных автоматических пушек, снабженных специальными переводчиками автоматического (самострельного) огня на одиночный (самозарядный) и обратно.

Третий вид оружия — с частичной автоматизацией — распространен среди образцов орудий противотанковой, танковой, зенитной, береговой и судовой артиллерии. Объясняется это тем, что в системах, предназначенных для стрельбы по подвижным целям, увеличение скорострельности путем полной автоматизации конструктивно осуществить трудно. Дело в том, что с увеличением калибров орудий автоматизация приводит к непропорционально большому увеличению габаритов и веса, осложняются отладка автоматики и особенно система питания, а в случае применения снарядов дистанционного действия необходимы также сложные специальные устройства для установки трубок. Вследствие этого автоматизируют лишь некоторую часть работ: три четверти, половину или четверть обычного цикла автоматики. Так, например, в некоторых образцах зенитных пушек автоматизировано три четверти всего процесса перезаряжания. При выстреле части оружия, имеющие откат по оси, обеспечивают открывание затвора и экстрактирование гильзы и одновременно аккумулируют каким-либо образом энергию (например в пружине) для автоматического закрывания затвора после досылки патрона вручную. Таким образом, автоматически совершаются три процесса: открывание затвора, экстрактирование гильзы и закрывание затвора.

Из известных конструкций наибольший калибр оружия с полной автоматизацией — 40 *мм* (40-*мм* „пулемет" Виккерса).

Предметом нашего изучения является автоматическое оружие и в большей степени — первый его вид, как наиболее приемлемый для вооружения самолетов.

Автоматическое оружие конструктивно выполняется и может быть выполнено самыми различными путями. Об этом свидетельствует разнообразие тех конструкций, которые состоят на вооружении армий всех стран, не говоря уже о том большом числе опытных образцов, которые не получили признания по тем или иным причинам, а также о громадном числе образцов, зарегистрированных в патентной литературе, подчас весьма оригинальных

---

[1] Занимающимся конструированием автоматического оружия (да и всякого оружия) рекомендуем ознакомиться с патентами на автоматическое оружие (класс 72-h), из которых можно почерпнуть много интересного.

Несмотря на обилие конструкций автоматического оружия, для всех них можно установить общие принципы действия и классифицировать по сходственным признакам.

Научная классификация оружия дает возможность сделать общие выводы по данному классу, установить достоинства и недостатки системы оружия в целом, а также его механизмов, и на основе этого сформулировать требования для проектирования новых, более совершенных образцов с учетом основного фактора — условий боевого применения.

Для вооружения самолетов, ввиду характерных особенностей воздушного боя, ограниченных возможностей размещения оружия и действий с ним, применяются конструкции, к которым предъявляются особые требования.

Однако классификация только одного авиационного автоматического оружия не даст полной картины принципов работы автоматического оружия вообще и тем более правильного понимания особенностей стрелково-пушечного вооружения самолетов. Поэтому более целесообразно изучить общую классификацию автоматического оружия.

Известны классификации нескольких специалистов: Вилле (Wille, 1896 г.), Кайзертрея (Kaisertreu, 1902 г.), Кордье (Cordier), Бутурлина (1912 г.), Девужа (Devouges, 1925 г.), Вильневича, Островского (W. Ostrowsky, 1930 г.), Федорова и Благонравова (1931—1932 гг.).

Некоторые классификации в своей основе имеют различные признаки, другие же являются последовательным развитием и уточнением предыдущих.

Не останавливаясь на разборе и критике этих классификаций и отсылая желающих к подробному труду В. Г. Федорова — „Эволюция стрелкового оружия“, ч. II, Воениздат, 1939 г., изложим наиболее правильную из них, которой придерживаются у нас в СССР. Классификация эта предложена проф. В. Г. Федоровым и уточнена проф. А. А. Благонравовым.

В основу своей классификации В. Г. Федоров и А. А. Благонравов положили признак действия пороховых газов на автоматику оружия и в дальнейшем подразделении — признак сочленения затвора со стволом.

Следует отметить, что не все образцы, характеризующие излагаемую ниже классификацию, нашли применение; многие из них характеризуют только пути развития оружия и имеют сейчас лишь историческое значение.

По основному признаку — принципу использования энергии пороховых газов — автоматическое оружие можно подразделить на три класса:

Первый класс — системы, работа которых построена на использовании энергии отдачи.

Второй класс — системы, работа которых построена на передаче автоматике действия пороховых газов при помощи спе-

циальных устройств (газовая камера, надульник, специальный капсюль).

Третий класс — системы с использованием реакции пули или снаряда при движении по каналу ствола.

§ 9. ПЕРВЫЙ КЛАСС

Отдача оружия, как известно, происходит в результате давления пороховых газов на дно канала ствола как в период движения пули по каналу, так и в период истечения газов из канала — *в период последействия* пороховых газов.

Энергия отдачи в автоматическом оружии используется тремя путями, и поэтому первый класс делится на три группы.

Первая группа—системы с отдачей затвора. В этих системах затвор подпирается к обрезу пенька ствола или одной возвратной пружиной, или дополнительными устройствами, которые создают сопротивления при отходе затвора назад.

В зависимости от характера устройств, обеспечивающих своевременное открывание затвора и дальнейшее его движение назад, первая группа делится на два типа.

Тип А — со свободным затвором. В системах этого типа под давлением пороховых газов, передающимся через дно гильзы на дно затвора, последний начинает отходить назад в тот момент, когда давление на дно гильзы больше суммы сопротивлений движению затвора.

Силы сопротивления движению затвора следующие: сопротивление пружины, трение затвора в направляющих короба, трение гильзы о стенки патронника. Ствол и сочлененные с ним вглухую части (короб и др.) не являются абсолютно неподвижными, так как на них действуют усилия: реакция пули при движении по нарезам, увлекающая ствол вперед; трение гильзы о стенки патронника, увлекающее его назад; реакция какой-либо опоры. Равнодействующая этих сил и сообщает стволу, а также сочлененным с ним деталям (коробу и др.) движение назад или вперед. Однако это движение, вследствие большой массы ствола и связанных с ним частей, а тем более при наличии какой-либо опоры, настолько ничтожно, что влияния на работу затвора практически не оказывает. Поэтому изучение действия автоматики связывается обычно только с перемещением затвора.

При отходе затвора назад экстрактируется гильза и сжимается возвратная пружина. После отхода затвора на длину, достаточную для захвата очередного патрона и досылки его в патронник, затвор под действием возвратной пружины возвращается в крайнее переднее положение, при котором стреляющий механизм производит следующий выстрел. (Можно, конечно, применить пружину и с работой на растяжение.)

В системах данного типа перемещения затвора назад должны быть согласованы с движением пули по каналу таким образом, чтобы затвор не открывался раньше, чем пуля покинет ствол.

Это согласование перемещений необходимо для того, чтобы часть гильзы, выходящая из патронника, могла выдержать имеющееся давление; в противном случае гильза может разорваться, газы прорвутся, что может разрушить систему и причинить вред стрелку.

Необходимое замедление движения затвора достигается благодаря сочетанию определенной массы затвора и упругости пружины. При этом возможность широкого выбора пружин с различными характеристиками ограничена, так как очень жесткие пружины, выгодные на начальном участке движения затвора, препятствуют его дальнейшему движению для полного отхода назад. Поэтому соответствующее сочетание сопротивлений пружины и затвора достигается в основном подбором затвора, который в этих системах бывает очень массивным.

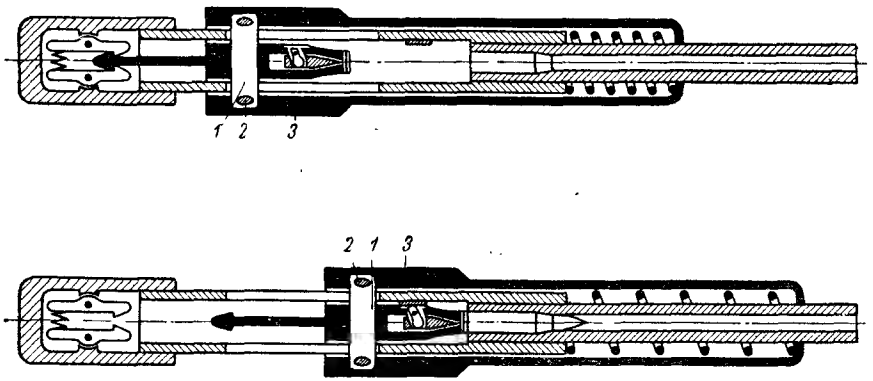


Рис. 17. Схема пушки „Эрликон".

В качестве примера на рис. 17 изображена схема действия автоматики 20-*мм* пушки „Эрликон", в которой затвор имеет небольшие размеры и массу. Увеличение массы затвора достигнуто присоединением к нему чекой *1* при помощи шпилек *2* подвижного кожуха *3*. В системе возможна регулировка упругости пружины. Сочетанием массы затвора и сопротивления пружины обеспечиваются необходимые перемещения затвора.

Положительное свойство таких систем — простота конструкции. Однако, вследствие того, что гильза начинает отходить назад при наличии давления в канале и существует опасность ее разрыва, такие системы выгодны в образцах с относительно малыми давлениями и короткими стволами. Поэтому данный принцип наиболее распространен среди пистолетов и пистолетов-пулеметов. В системах большей мощности — в пулеметах, пушках и даже винтовках — требуется ряд дополнительных мероприятий, обеспечивающих легкость экстрактирования гильзы.

Для более легкого экстрактирования гильз и предотвращения их разрыва применяется смазка патронов или патрон-

ника перед введением патронов (что требует специальных устройств) или устройство так называемых канавок Ревелли.

Канавки Ревелли представляют собой продольные канавки по поверхности патронника и пульного входа (рис. 18). Пороховые газы, следующие за пулей, распространяются по канавкам назад и действуют на внешнюю поверхность гильзы. Благодаря этому частично уменьшается и давление гильзы на стенки патронника. Впервые этот способ был осуществлен в 1929 г. в итальянском пулемете Ревелли, а затем и в ряде других образцов, по принципу отличных от пулемета Ревелли.

Представители систем со свободным затвором: пистолеты Браунинга, пистолет-пулемет Бергмана, пушка „Эрликон" и др.

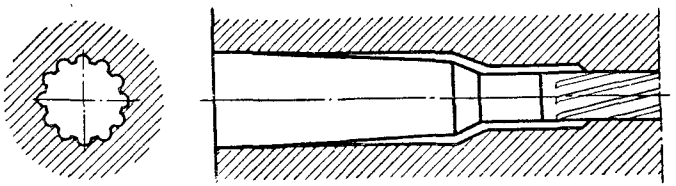


Рис. 18. Канавки Ревелли

Тип Б — с полусвободным затвором. В системах с полусвободным затвором, вследствие наличия некоторых добавочных устройств, движение затвора в первый момент замедлено, благодаря чему уменьшается опасность разрыва гильзы.

В существующих образцах автоматического оружия в основу конструкции затворов с замедленным открыванием положены следующие группы устройств:

1. Шатунно-кривошипное сочленение частей затвора, которые связаны между собой так, что в момент выстрела части затвора, особенно примыкающие непосредственно к стволу, перемещаются незначительно благодаря сочленению звеньев вблизи мертвой точки.

Подобный принцип осуществлен в пулеметах Шварцлозе и Шкода, в автоматической винтовке Педерсена и др.

Так, у пулемета Шкода (рис. 19) массивный затвор *1*, поворачивающийся относительно оси *2*, подпирается шатуном *3*, который, в свою очередь, сидит на оси *4* и поджимается возвратной пружиной *5*. Так как ось *4* вращения шатуна смещена относительно опорных плоскостей затвора и шатуна, то в начале поворота затвору и шатуну приходится переходить через мертвую точку, что обусловливает замедленное его движение в первый момент.

2. Поворот затвора в целом или его частей на начальном участке конструктивно разрешен устройством на затворе или его деталях специальных выступов, которые скользят по выемкам в ствольной коробке. Замедленное открывание затвора обеспечивается малым наклоном скосов выемок. На подобном принципе устроены пулемет SIA (Societa Italiana Anonima),

автоматическая винтовка Манлихера, автоматическая винтовка Томсона и др.

У пулемета SIA на массивном цилиндрическом затворе имеется боковой выступ, который при крайнем переднем положении затвора входит в наклонный паз ствольной коробки. При выстреле затвор, благодаря скольжению выступа по скосу ствольной коробки, поворачивается, медленно отходит назад и, по выходе выступа в продольный паз коробки, приобретает скорость, необходимую для работы автоматики.

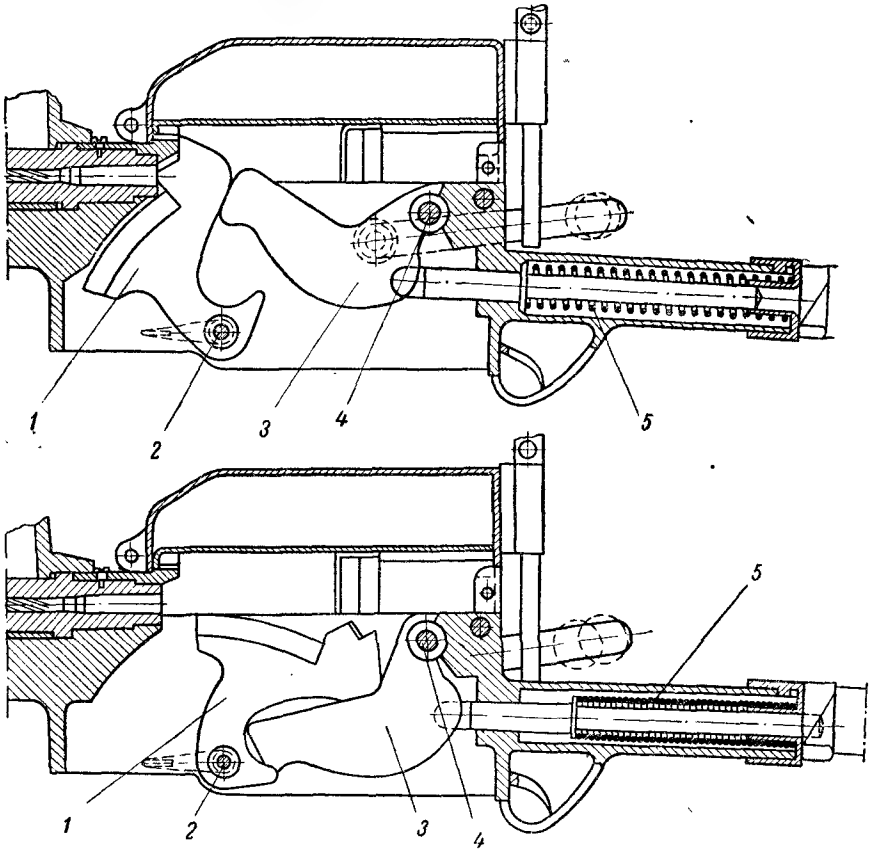


Рис. 19. Схема запирания пулемета Шкода.

Устройство винтовки Манлихера напоминает нашу винтовку образца 1891/1930 гг., с той лишь разницей, что пазы в ствольной коробке сделаны наклонными, выступы затвора скользят по наклонным пазам ствольной коробки и открывание затвора происходит с замедлением.

3. Применение трущихся поверхностей. В основу конструкции данного типа оружия положено известное свойство трущихся поверхностей: при увеличении удельного давления возрастает коэфициент кинематического трения.

Примером подобной конструкции служит американский пистолет-пулемет Томсона [1] под пистолетный патрон Кольта калибром 11,43 *мм* (рис. 20), в котором замедление открывания затвора осуществлено следующим образом.

Вкладыш *1*, имеющий вид вилки, двигается по наклонным пазам затвора, угол наклона которых к оси затвора равен 70°, и в то же время выступы *2* вкладыша скользят по пазам коробки с наклоном в 45°. После вылета пули выступы вкладыша входят в продольные пазы, и затвор, освобожденный от связи вкладыша со ствольной коробкой, двигается назад.

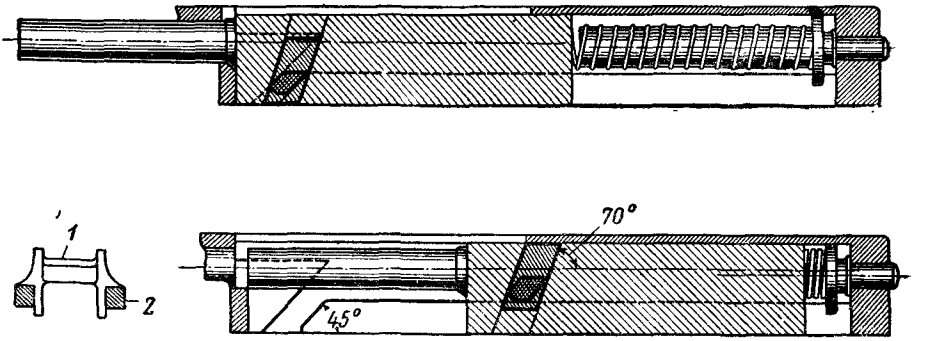


Рис. 20. Схема пистолета-пулемета Томсона.

Вторая группа — системы с отдачей ствола. В системах этой группы подвижный ствол с помощью различных устройств прочно сцепляется с затвором и представляет единую откатную массу. После вылета пули из канала ствола, когда откатная масса ствол — затвор несколько переместится назад, требуется расцепить затвор со стволом и сообщить им такое относительное перемещение, при котором можно экстрактировать гильзу, ввести в патронник очередной патрон и привести систему в положение для следующего выстрела.

Системы этой группы можно подразделить на два типа, в зависимости от того, при каком положении откатных частей затвор и ствол расцепляются и начинается их относительное перемещение.

Тип А — системы с коротким ходом ствола. Устройство и действие систем этого типа заключается в следующем.

Ствол и затвор, прочно сцепленные, отходят вместе назад на относительно малом участке пути за промежуток времени

---

[1] Во всех классификациях, в том числе и у самого Томсона, предполагается „задержка" затвора в первый момент движения благодаря изменению коэфициента трения от увеличения удельного давления. Это не отвечает существу явления, и в действительности затвор имеет не задержку, а замедленное открывание (см. § 39).

от момента начала движения пули до момента вылета ее из канала ствола (или несколько позже). В конце совместного отхода они расцепляются, затвор по инерции продолжает движение назад и экстрактирует гильзу. При возвратном движении затвор досылает очередной патрон в патронник. Ствол или ожидает подхода затвора и затем двигается вместе в крайнее переднее положение, или непосредственно после расцепления возвращается в переднее положение, в котором он сцепляется с затвором, и происходит очередной выстрел.

Как правило, затворы у систем этого типа снабжаются ускорителями, которые после расцепления сообщают затворам дополнительную скорость.

Этот тип оружия весьма распространен вообще и в частности среди авиационных систем. В качестве образцов можно указать пулеметы: ПВ-1 (Максим), Виккерса, Браунинга, Бреда и др.

Как правило, в системах с коротким ходом ствола в процессе работы автоматики сам ствол имеет прямолинейное поступательно-возвратное движение, а сочлененный с ним затвор или его части при открывании имеют самые различные и сложные формы перемещений: с поворотом, с качанием, со смещением в сторону и т. д.

В этой группе следует отметить две интересные разновидности:

1. Системы с коротким ходом ствола, который при откате поворачивается относительно продольной оси и при этом расцепляет затвор. Последний по инерции продолжает движение назад. Подобный принцип применен в пистолете Рота.

2. Системы со снижающимся стволом, у которых ствол в конце отхода назад, в момент расцепления затвора, опускается относительно продольной оси, после чего затвор отбрасывается назад. Подобное устройство применено в пистолете Кольта-Браунинга.

Тип Б — системы с длинным ходом ствола. В системах этого типа ствол и сцепленный с ним затвор, вследствие отдачи, перемещаются вместе до крайнего заднего положения, где затвор задерживается, а ствол после расцепления движется в крайнее переднее положение, экстрактируя при этом гильзу.

В конце хода, при крайнем переднем положении, ствол с помощью какого-либо устройства освобождает затвор, который, двигаясь вперед, досылает в патронник очередной патрон и вновь сцепляется со стволом, после чего действует стреляющий механизм.

Работа оружия этого типа требует наличия двух возвратных пружин — ствольной и затворной.

Данный принцип осуществлен в конструкциях 8-*мм* французского пулемета Шоша образца 1915 г. и 37-*мм* авиационной пушки Виккерса-Армстронга.

Третья группа — системы с отдачей всего оружия. В системах этого типа отдача оружия в целом (при неподвижном

стволе относительно короба и ложи) используется для расцепления затвора от ствола и отбрасывания затвора назад.

В известных образцах этой группы расцепление затвора в необходимый момент осуществляется особым инерционным телом.

Эта группа включает два типа:

Тип А — системы с инерционным телом, при помощи которого во время отдачи всей системы открывается затвор, после чего остаточным давлением газов он отбрасывается назад.

Примером подобного устройства является одна из систем Маузера (рис. 21). В данной схеме затвор *1* прочно запирает ствол боевыми упорами *2*, сочлененными со ствольной коробкой. Инерционное тело представляет собой ползун *3* с пазами *4*,

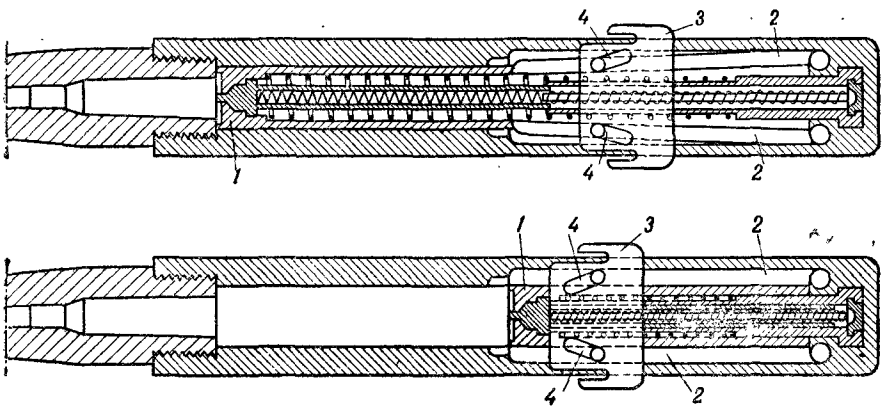


Рис. 21. Система Маузера с инерционным телом.

в которые входят ролики упоров. При отдаче всей системы ползун, вследствие инерции отставая, перемещается относительно короба, и в это время боевые упоры, благодаря скольжению роликов по пазам ползуна, разводятся в стороны, а затвор остаточным давлением газов отбрасывается назад. Так как затвор открывается и отбрасывается назад при наличии некоторого остаточного давления газов, то экстрактирование гильзы затрудняется (требуется осалка гильз). Если прибегнуть к более позднему открыванию затвора, то энергии может оказаться недостаточно для работы автоматики.

Тип Б — системы с инерционным телом, при помощи которого во время отдачи всей системы аккумулируется энергия, используемая затем для открывания затвора и отбрасывания его назад.

Примером подобного устройства служит система Шегрень (рис. 22). В этой системе цилиндрический затвор *1* сцеплен с коробкой личинками *2*. Сверху на коробке помещено инерционное тело — ползун *3*, который имеет цилиндрический шип *4*, расположенный между задними концами личинок. Спереди

ползун подпирается пружиной 5. Во время выстрела и отдачи всей системы ползун, по инерции отставая в своем движении от прочих частей, сжимает пружину 5. Сжатая пружина отбрасывает ползун назад, шип 4 разводит личинки в стороны и освобождает затвор от соединения с коробом, после чего затвор отходит назад, сжимая другую, возвратную, пружину 6.

Масса ползуна, очевидно, должна быть достаточно большой для сжатия сильной возвратной пружины; при этом облегчается экстрактирование гильзы, так как открывание затвора возможно при наличии незначительных давлений в патроннике.

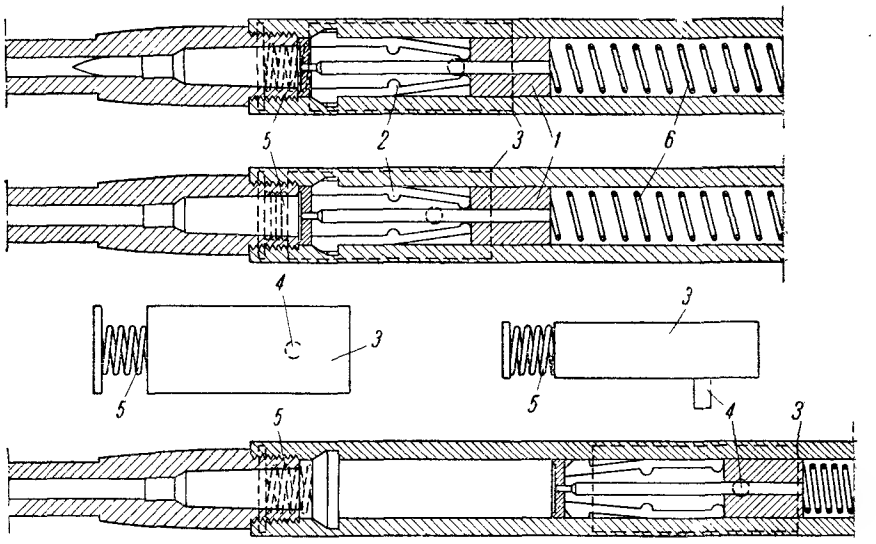


Рис. 22. Система Шегрень.

К системам этого типа можно отнести первое автоматическое ружье Максима образца 1883 г. Эти системы распространения не получили.

§ 10. ВТОРОЙ КЛАСС

Ко второму классу относятся системы, работа которых построена на передаче автоматике действия пороховых газов через специальные устройства. В зависимости от способа передачи автоматике действия пороховых газов этот класс подразделяется на три группы:

Первая группа — системы с отводом газов через особый канал в стенке ствола. В системах этой группы на стволе (обычно в передней его половине) сверху, снизу или даже сбоку имеется специальное газоотводное отверстие, через которое часть газов, двигающихся за пулей, отводится в особую камеру. Эти газы воздействуют на подвижный поршень, который через промежуточные детали или механизмы связан с затвором.

Движение поршня под действием отводимых газов начинается еще в тот момент, когда пуля находится в канале ствола. Но открывать затвор раньше, чем пуля покинет ствол, недопустимо. Поэтому в системах с отводом газов, как правило, за промежуток времени от начала действия газов на поршень и до вылета пули из канала поршень и связанные с ним промежуточные детали совершают относительно затвора холостое перемещение. Только после вылета пули из канала затвор расцепляется и отбрасывается назад. В переднее положение подвижные части досылаются действием возвратной пружины.

В зависимости от характера перемещений поршня и промежуточных между поршнем и затвором деталей или механизмов, первую группу можно подразделить на четыре типа.

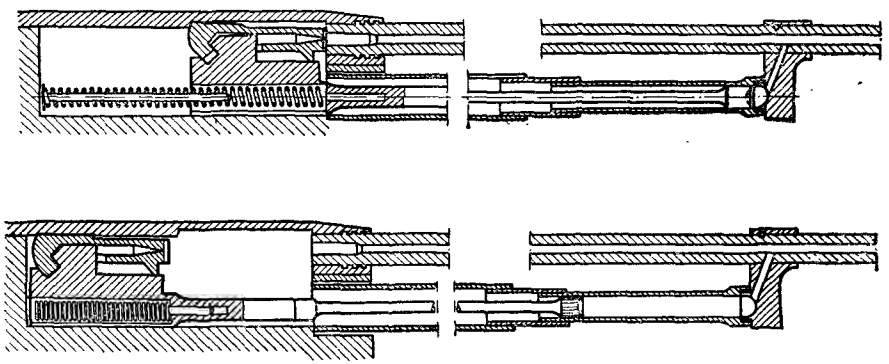


Рис. 23. Схема пулемета Дарна.

Тип А — системы с поступательным движением поршня назад. В этих системах поршень через промежуточную деталь — шток — связан с затвором и при выстреле совместно движется назад. Это — наиболее распространенный тип оружия, представителями которого являются пулеметы: Дегтярева, Льюиса, Дарна, Виккерса-Бертье, Шательро, Гочкиса, ZB-26 и многие другие [1]. Так, на рис. 23 приведена схема действия пулемета Дарна.

Тип Б — системы с поступательным движением поршня вперед и трансформированием этого движения для отхода затвора назад. Представителем этого типа является французский пулемет Сент-Этьен, работа которого протекает следующим образом (рис. 24).

Пороховые газы, отводимые в камеру, посылают поршень вперед. Движение поршня *1* через соединенный с ним шток *2*

[1] Оригинальной конструкцией этого типа является пулемет Фаркауэр. Для более плавного отбрасывания затвора назад в нем применено устройство, в котором поршень сжимает специальную рабочую пружину (main spring); работа ее затем используется для приведения в движение другого поршня, связанного с затвором.

с зубчатой рейкой вызывает вращение зубчатки *3*, рычаг *4* которой своим пальцем *5* с надетым на него роликом скользит по пазу затвора и отбрасывает его назад. Движение пальца *5* в пределах криволинейного участка паза затвора соответствует холостому ходу штока.

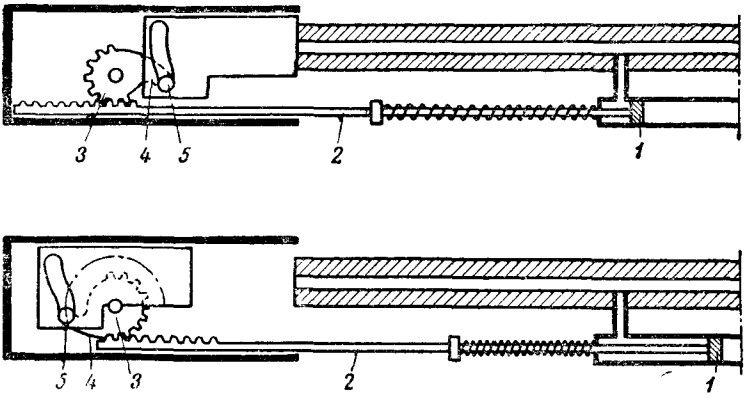


Рис. 24. Схема пулемета Сент-Этьен.

Тип В — системы с вращательным движением поршня и с трансформированием этого движения в поступательное движение затвора назад. Примером подобного устройства служит пулемет Кольта (рис. 25), принцип работы которого заключается в следующем.

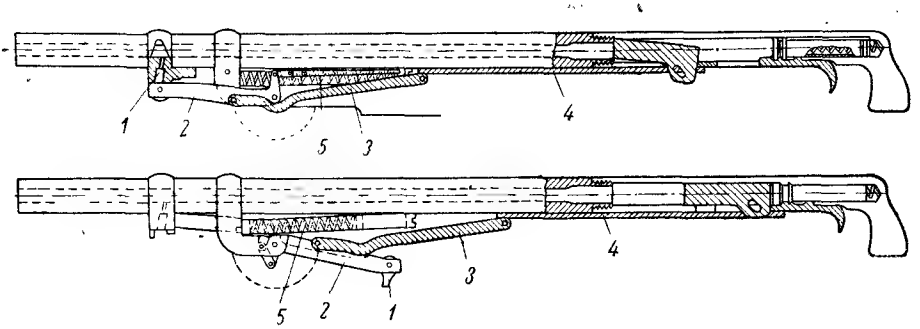


Рис. 25. Схема пулемета Кольта.

Пороховые газы, отводимые через канал в стволе, действуя на поршень *1*, который насажен на шатун *2*, сообщают последнему вращательное движение. Шатун посредством мотыля *3* перемещает поступательно назад планку *4*, при помощи которой открывает затвор и отбрасывает его назад. Две возвратные пружины *5* при этом сжимаются и затем возвращают в исходное положение подвижные части системы.

Ствол в системах указанных типов неподвижен.

Тип Г — системы, у которых отвод пороховых газов используется для одновременного движения ствола вперед и затвора назад. Подобный принцип работы оружия известен из патентной литературы [1]. Примерное устройство такой системы показано на рис. 26.

Пороховые газы, входящие в газовую камеру, действуют на поршень *1*, насаженный на ствол, и заставляют последний двигаться вперед относительно короба. При движении вперед ствол через зубчатую рейку и промежуточную шестерню *2* сообщает противоположное движение детали *3*. Деталь *3* на некотором пути расцепляет затвор *4* от ствола и отбрасывает его назад.

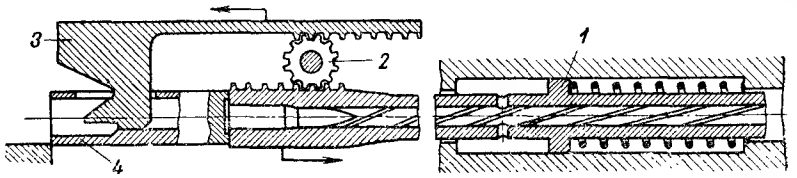


Рис. 26. Схема движения ствола вперед, затвора назад.

Вторая группа — системы с передачей автоматике энергии газов посредством надульников. Иногда эти системы называют системами, действующими от отработанных газов. Системы эти можно подразделить на два типа:

Тип А — системы с надульником, связанным со стволом. Представителем этого типа служит система Дыбовского, приведенная на рис. 27 и не требующая пояснений.

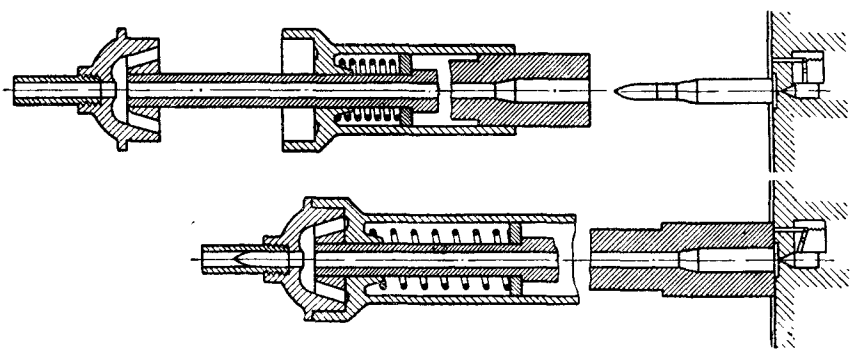


Рис. 27. Система Дыбовского.

Тип Б — системы с подвижным относительно ствола надульником. Примером подобной системы является автоматическая винтовка Банга (также и пулемет Ютo).

В этой системе (рис. 28) надульник *1* под действием газов двигается относительно ствола вперед и тем самым вызывает

[1] Патент, выданный Я. П. Авдышеву в 1926 г. Заявочное свидетельство № 9886, класс 72-в-7.

перемещение тяги *2*, которая рычагом *3* отбрасывает планку *4* затвора; планка *4* при ходе назад сначала поворачивает затвор и расцепляет его от ствола, а затем отводит затвор в крайнее заднее положение.

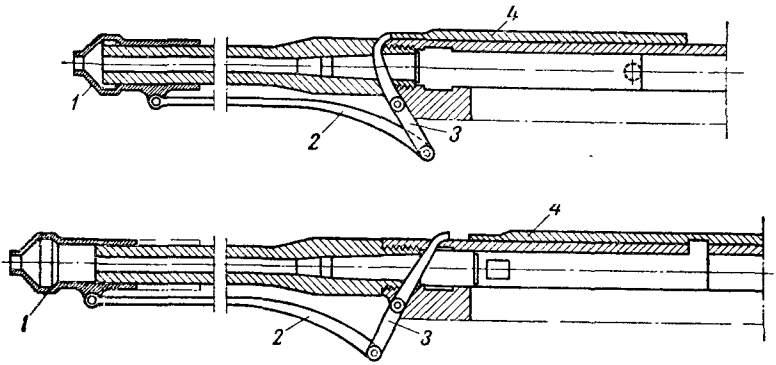


Рис. 28. Система Банга.

Третья группа — системы с отводом части газов через дно гильзы. Представителем, к тому же единственным, этой группы является автоматическое ружье Рота (рис. 29), которое действует следующим образом.

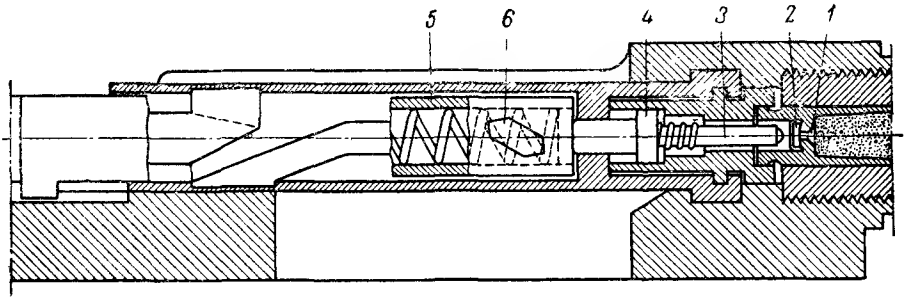


Рис. 29. Система Рота.

Гильза имеет толстое дно и длинный канал, куда входит ударник. При выстреле пороховые газы, прорвавшиеся через затравочные отверстия *1* дна гильзы, отбрасывают назад капсюль *2*, а вместе с ним и ударник *3*, который может перемещаться до упора венчика *4* в перегородку затворного цилиндра.

Действием ударника отбрасывается курок *5*, который при движении назад поворачивает и расцепляет затвор своим выступом *6*, входящим в наклонный паз цилиндра затвора. Перезаряжание обеспечивается приобретенной живой силой ударника и остаточным давлением газов.

Необходимость иметь особые патроны, сложность их производства и отладки, в особенности столь мелкой детали, как

капсюль, который играет роль обтюратора, а также необходимость более раннего открывания и, в связи с этим, затрудненное экстрактирование гильзы исключают возможность боевого применения оружия, построенного на этом принципе.

§ 11. ТРЕТИЙ КЛАСС

К третьему классу относятся системы, работающие на принципе использования реакции связи пули с нарезами (движение ствола вперед).

В системах этого класса при движении пули по каналу ствола, вследствие реакции связи ее с нарезами, ствол увлекается вперед; перемещение ствола используется для приведения в действие механизмов перезаряжания (рис. 30). Примером подобного устройства служат пистолеты Манлихера, Вессона и др.

Этот принцип можно использовать главным образом для оружия малой мощности (пистолетов). Для образцов же большей скорострельности данный принцип вряд ли применим, по той причине, что работа автоматики находится в большой зависимости от износа и разгара ствола.

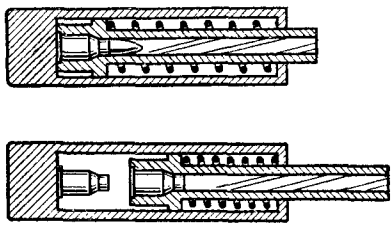


Рис. 30. Система с подвижным стволом от реакции пули.

Приведенными тремя классами можно ограничить классификацию автоматического оружия, так как всякое конструктивное видоизменение может быть отнесено к тому или иному классу.

В связи с приведенной классификацией автоматического оружия, основной смысл боевого применения которого заключается в скорострельности, следует остановиться еще на двух видах скорострельного оружия: на механизированном и механическом оружии.

Механизированным оружием называется такое, у которого все механизмы перезаряжания и производства выстрела или часть их действуют от какого-либо постороннего источника энергии.

Достоинства механизированного оружия следующие:

1. Возможность получения относительно высокого темпа стрельбы.
2. Упрощение конструкции оружия при одновременной возможности уменьшения веса.
3. Меньшая чувствительность механизмов к неточностям обработки, вследствие чего может быть применен более низкий класс точности.
4. Независимость работы оружия от метеорологических условий и условий стрельбы при различных перемещениях самолета.
5. Возможность регулировки темпа стрельбы изменением передаточного числа трансмиссии.

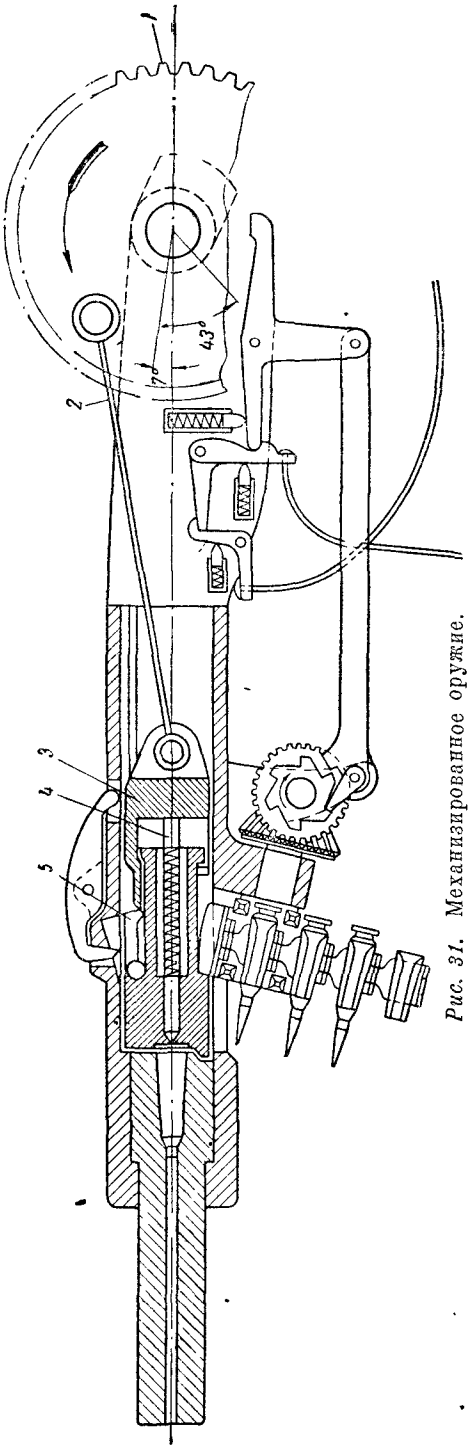


Рис. 31. Механизированное оружие.

6. Возможность проектирования подачи с отдельным независимым включением и выключением.

7. При осечке после перезаряжания приводом система продолжает работать, т. е. работа автоматики не зависит от выстрела.

8. Отсутствие механизмов перезаряжания; перед началом стрельбы необязательно вводить в патронник очередной патрон, так как после холостого хода привода автоматика начинает работать.

Из недостатков механизированных пулеметов следует отметить наличие несколько сложных трансмиссионных механизмов, применяемых для предохранения от преждевременного открывания затвора при затяжных выстрелах, выключения трансмиссий (или механизмов) при задержках, во избежание поломок, и включения их во время работы мотора с предохранением от ударов в механизме.

В отношении общего проектирования механизированные системы имеют значительное преимущество перед автоматическими.

При проектировании автоматического оружия действующие усилия определить очень трудно, и приходится лишь приближенно теоретически решать вопросы, связанные с движением элементов механизмов. Уточняются эти вопросы уже в процессе изготовления опытных образцов.

В механизированном оружии движение частей под-

чиняется определенным закономерностям обычных механических движений и может быть рассчитано общими методами теории механизмов. Решение задачи безопасности при затяжных выстрелах может привести к снижению темпа стрельбы настолько, что выгоды применения механизированного пулемета могут быть сведены на-нет.

В механизированных системах вращательное движение вала мотора обычно преобразуется в поступательное движение затвора (или ствола) при помощи кривошипных сочленений. Примерная схема работы такого оружия приведена на рис. 31.

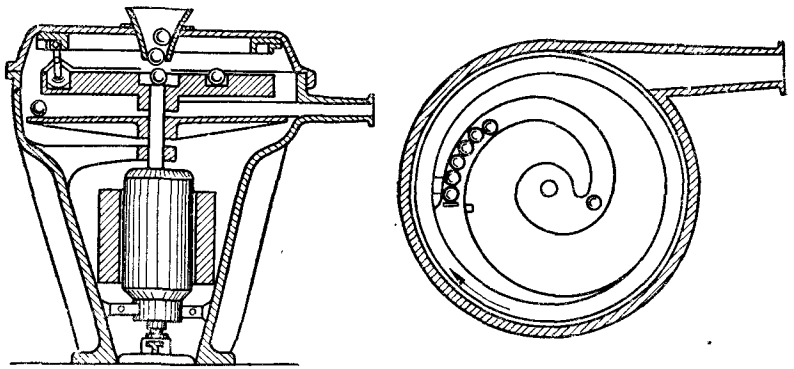


Рис. 32. Механическое оружие.

Шестерня *1*, приводимая во вращение от вала мотора через трансмиссионные устройства, шатуном *2* связана с ползуном *3*, к которому прикреплен ударник *4*. На схеме показан момент подхода остова затвора в крайнее переднее положение. При дальнейшем вращении шестерни *1* ползун *3*, перемещаясь вперед, поднимает запирающую личинку *5*, и при угле 7° до передней мертвой точки происходит удар по капсюлю. При дальнейшем вращении шестерни и движении только одного ползуна затвор расцепляется при угле 36°.

Таким образом, весь холостой ход ползуна происходит при повороте шатуна на 43°, так как при максимальном числе оборотов время поворота шатуна на угол 43° больше времени затяжного выстрела.

Механическим оружием называется такое, в котором энергия движения пули приобретается не за счет энергии взрыва пороха, а за счет механической энергии какого-либо двигателя. Представителем подобного оружия является центробежное оружие.

Идея центробежного оружия не нова. Если ознакомиться с патентами (особенно с французскими и немецкими класса 72-b-6), то, начиная с 1890 г., можно найти очень много интересных конструкций центробежных пулеметов, построенных на различных принципах, включая и электромагнитные (с использованием бегущего или вращающегося магнитного поля).

Известно, что в 1914 г. в России испытывалась центробежная автомобильная установка для стрельбы дисковыми снарядами (конструкция Безобразова). Результаты были не совсем удовлетворительными.

Простейшая схема установки изображена на рис. 32. Здесь умышленно приведена очень ранняя схема, зарегистрированная американцем Гриффином еще в 1896 г. (германский патент № 87964 класса 72-b-6), которую и в настоящее время очень часто повторяют в предложениях. Устройство и действие оружия ясны из рисунка.

Глава III

ПАТРОНЫ

§ 12. ОСНОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ПУЛЬ, СНАРЯДОВ И ПАТРОНОВ

А. КЛАССИФИКАЦИЯ ПАТРОНОВ

Для всех видов стрелкового оружия и малокалиберных автоматических пушек применяются исключительно унитарные патроны.

В унитарном патроне все элементы его — пуля, гильза, заряд, капсюль (или капсюльная втулка) — прочно соединены в единое целое, что позволяет производить заряжание в один прием.

Унитарные патроны подразделяются на *боевые* и *вспомогательные*.

Боевые патроны. Номенклатура боевых патронов стрелкового оружия в настоящее время очень обширна, что вызвано сложными условиями современного боя, и классифицируется следующим образом.

Патрон с обыкновенной пулей — легкой и тяжелой. Патрон с легкой пулей является основным и может быть использован для всех видов оружия; применяется главным образом для поражения живой силы и материальной части противника. Патрон с тяжелой пулей предназначен для стрельбы в основном из станковых пулеметов (дальность до 4 000 *м*) и в авиации не применяется.

Патрон с бронебойной пулей применяется против целей, имеющих броневые прикрытия.

Патрон с трассирующей пулей, которая оставляет дымовой или световой след, благодаря чему возможно наблюдать за результатами стрельбы; применяется обычно для стрельбы по подвижным целям и в ночном бою.

Патрон с зажигательной пулей служит для поджигания воздушных целей и строений с горючими материалами.

Патрон с пристрелочной (разрывной) пулей предназначается для наблюдения за результатами стрельбы и как средство увеличения области поражения.

Патроны двойного действия представляют комбинации предыдущих видов. Наиболее распространены из них: а) бронебойно-трассирующие; б) бронебойно-зажигательные.

Патроны тройного действия являются сочетанием трех видов действия. Наибольшее распространение получил патрон бронебойно-зажигательно-трассирующий.

По внешнему виду боевые патроны различают по окраске части оживала или донышка капсюля.

Наши патроны имеют окраску головки (на 5 *мм* от вершины) следующих цветов:

патрон с легкой пулей — без окраски;
„ с тяжелой пулей — желтый;
„ с бронебойной пулей — черный;
„ с трассирующей пулей — зеленый;
„ с зажигательной пулей — красный;
„ с пристрелочной пулей — белый;
„ с бронебойно-трассирующей пулей — фиолетовый;
„ с бронебойно-зажигательной пулей — черный с красным.

Вспомогательные патроны включают:

учебные — для обучения приемам заряжания и проверки действия механизмов оружия;

холостые — для имитации стрельбы во время тактических учений и маневров, для салютирования и пр.

Для малокалиберных автоматических пушек, особенно авиационных, применяются снаряды следующих типов: 1) осколочные; 2) бронебойные; 3) зажигательные; 4) осколочно-трассирующие; 5) бронебойно-трассирующие. Описание устройств и действия снарядов приведено в § 17.

Из приведенной классификации видно, какое большое разнообразие типов патронов применяется в настоящее время. При массовом производстве патронов это осложняет не только само производство, которое должно быть наиболее простым, но и вносит затруднения при снабжении частей. Снабжение частей патронами всех необходимых видов в военное время является делом сложным и исключительно ответственным, особенно в в связи с их громадным расходом.

Очевидно, при современном состоянии технических средств борьбы, разнообразии образцов оружия и возросшей его скорострельности вопросы экономики (конструкция и производство) и снабжения патронами становятся чрезвычайно важными и требуют детального изучения.

Рациональная конструкция оружия, особенно автоматического, с высокими балистическими и боевыми качествами, получается только тогда, когда при проектировании оружия снаряду и патрону уделено достаточное внимание.

Вообще наиболее правильно разработку конструкции оружия начинать с боеприпасов.

§ 13. ВНЕШНЕЕ УСТРОЙСТВО ПУЛЬ И СНАРЯДОВ

Рациональная конструкция пули или снаряда должна обеспечивать наивыгоднейшее сочетание досягаемости, меткости и поражающего действия.

Поэтому форма пуль и снарядов, их устройство, весовые данные, относительные размеры, материалы для изготовления и снаряжения и другие характеристики подчинены целому ряду требований, которые вытекают из условий: а) движения по каналу оружия; б) движения в воздухе и в) характера действия у цели.

На правильное и безотказное действие автоматического оружия конструкция пули или снаряда, в особенности специального назначения, оказывает весьма важное влияние.

Исторически понятия „пуля" и „снаряд" сложились в том смысле, что боеприпасы продолговатой формы для артиллерийских орудий, дающие возможность *снаряжения* внутренней полости разрывным или иным зарядом, носили название *снарядов*. Боеприпасы же, которые применялись для ручного оружия, представляли сплошные тела без всякой „начинки" и назывались *пулями*.

Естественно, что это различие определялось и калибрами, разница в которых была существенной. В начале развития нарезного оружия минимальный калибр для орудий был близок к 75 *мм*, а максимальный для ружей — 17—18 *мм*. К началу первой империалистической войны 1914—1918 гг. наименьший калибр для орудий был 37 *мм*, а наибольший для ручного оружия — 12,7 *мм*.

Сейчас разница между образцами стрелкового и артиллерийского вооружения по калибру стерлась. Между калибрами 12,7 и 37 *мм* имеются (и, очевидно, разрабатываются) промежуточные калибры: 14, 16, 20, 23, 25 *мм* и др.

Кроме того, пули даже и наименьшего боевого калибра (6,5 *мм*) по современному состоянию техники возможно не только снаряжать различными составами (трассирующими, зажигательными и др.), но и снабжать различными механическими устройствами (разрывными и др.).

Поэтому сейчас понятия „пуля" и „снаряд" следует различать только по способу сообщения им вращательного движения в канале оружия, а в связи с этим и относить оружие к категории стрелкового или пушечного.

Пуля при движении по каналу ствола получает вращательное движение благодаря врезанию в нарезы (заполнению нарезов) непосредственно некоторой частью своего корпуса.

Снаряд при движении по каналу получает вращательное движение благодаря врезанию в нарезы специально надетого на его корпус ведущего пояска.

Разница в способах ведения пуль и снарядов по нарезной части оружия вносит различие во внешнее их устройство, применяемые материалы, технологию производства, внутреннее устройство стволов и сроки их службы.

Внешнее очертание пуль и снарядов подчинено в основном задаче уменьшения сопротивления воздуха. Установить какие-либо аналитические зависимости для элементов внешней формы, ввиду математической сложности, не представляется возможным.

Критерием для подбора наивыгоднейших относительных размеров пуль и снарядов служат имеющийся опытный материал и непосредственный эксперимент.

Различают три характерные части пуль: 1) головную, или оживальную; 2) среднюю, или ведущую, и 3) хвостовую (рис. 33).

Формой головной части пуль (и снарядов) в большинстве случаев является тело, образованное вращением дуги окружности относительно продольной оси. Обычно дуга сопряжена с образующей цилиндрической части; в этом случае центр окружности образующей дуги лежит в плоскости основания цилиндрической части.

Иногда у пуль делается более резкий переход от ведущей (средней) части к оживальной, что достигается смещением центра C образующей окружности к хвостовой части.

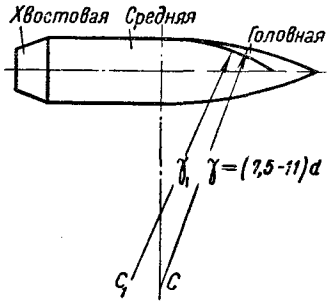


Рис. 33. Общий вид пули.

Опыт показывает, что при современных начальных скоростях 600—1000 *м/сек* радиус оживальной части для пуль лежит в пределах

$$\gamma = (7{,}5 \div 11)\, d, \qquad (83)$$

где d — калибр оружия.

Длина головной части при этих условиях для пуль колеблется в интервале 2,5 — 3,5 калибра. Длина ведущей части подбирается так, чтобы при существующей крутизне нарезки усилие на оболочку при движении по нарезной части не приводило к срывам с нарезов. Длина ведущей части пуль колеблется в пределах 1 — 1,5 калибра.

Хвостовая часть — цилиндрическая или имеет вид усеченного конуса. Здесь следует напомнить выводы из внешней балистики, согласно которым форма хвостовой (запоясковой) части не оказывает заметного влияния на уменьшение сопротивления воздуха, если снаряд пролетает всю траекторию со скоростью, большей скорости звука.

Это свойство в известной мере объясняет то обстоятельство, что так называемые легкие пули, предназначенные в основном для стрельбы на малые и средние дальности, на которых скорости не падают меньше скорости звука, не имеют конической части.

Современные пули и малокалиберные снаряды, используемые в основном на большие дальности, снабжаются конической хвостовой частью. Примером может служить наша тяжелая пуля образца 1930 г. весом 11,8 *г*, предназначенная для стрельбы из пулеметов на относительно большие дальности (до 4 000 *м*), испанская пуля РР и др. Конус принимается в 6° — 9°.

Длина хвостовой части колеблется в пределах 0,5 — 1,0 калибра. Общая длина современных пуль при существующей

крутизне нарезки не превосходит 5 калибров, чем обеспечивается устойчивость пули на полете (см. § 21).

Малокалиберные снаряды отличаются внешне от пуль тем, что они имеют: ведущий поясок, центрующее утолщение, устройство для закрепления трубки или взрывателя (головного или донного). В соответствии с этим части снаряда называются: 1) головная, или оживальная; 2) центрующее утолщение; 3) средняя, или цилиндрическая, и 4) запоясковая (рис. 34).

Ведущий поясок служит, во-первых, для сообщения вращения снаряду и центрования заднего конца его и, во-вторых, для обтюрации от прорыва газов вперед.

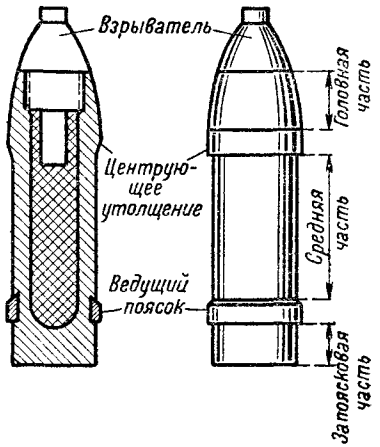


Рис. 34. Общий вид снаряда.

Центрующее утолщение представляет собой точно обработанную небольшую поверхность цилиндрической части снаряда, обычно у перехода к оживалу. Назначение его — центрование переднего конца снаряда, т. е. совмещение осей снаряда и канала, чем обеспечивается движение снаряда по каналу без колебаний и устраняется повреждение нарезов.

Наличие небольшой центрующей поверхности с более точной обработкой позволяет остальную цилиндрическую часть обрабатывать с меньшей точностью, что при массовом производстве снарядов значительно их удешевляет. Кроме того, уменьшается износ орудий, так как трение одинаковых материалов (сталь по стали) происходит на меньшей поверхности.

Диаметр снаряда по центрующему утолщению для малокалиберных снарядов должен отличаться от калибра не более чем на 0,10—0,15 *мм*; ширина — 0,15—0,20 калибра.

Форма головной части снарядов представляет также дугу окружности, но для малокалиберных снарядов радиус оживала обычно значительно меньше, чем у снарядов больших калибров (у которых $\gamma = 10 \div 15$) и у пуль. Объясняется это тем, что габариты головных взрывателей не вписываются в очень острые очертания оживала.

У малокалиберных снарядов обычно приходится делать сопряжение оживала в соответствии с очертанием взрывателя. Кроме того, получить снаряд заданного веса при наличии внутренней полости для взрывчатого вещества с малым удельным весом (тротил—1,56) и при стальной оболочке с удельным весом 7,85—7,86 можно только в результате значительного удлинения снаряда. Длина снаряда также должна быть связана с крутизной нарезки и, как правило, для принятой крутизны (25—30 калибров) не превышает 5 калибров. По этим

причинам радиус оживала для малокалиберных снарядов лежит в пределах

$$\gamma = (7 \div 10)d; \qquad (84)$$

у некоторых снарядов радиус оживала снижается даже до 4 калибров.

Для снарядов с донным взрывателем, обычно бронебойных с более толстой стенкой, можно увеличить радиус оживала, но здесь мешает еще одно условие. Дело в том, что в автоматических пушках для безотказности подачи общая длина патронов со снарядами различного целевого назначения должна быть одинаковой.

§ 14. ВЕДУЩИЕ УСТРОЙСТВА

Ведущие устройства представляют собой весьма ответственные элементы пуль и снарядов. При выборе конструкции и материала ведущих устройств необходимо считаться не только с нужной для устойчивости на полете угловой скоростью, но и с вопросами сопротивления воздуха, прочностью корпуса и износом канала оружия.

С момента массового появления в войсках нарезного ручного оружия (первая четверть XIX века) до перевооружения армий магазинным оружием (конец XIX века) и введения в то же время автоматического оружия (пулеметов) применялись пули сначала сферические, а затем и продолговатые — сплошные свинцовые.

Свинец, обладающий относительно большим удельным весом (11,34) и весьма пластичными свойствами, технологически простой в обработке (литье) и дешевый, применялся для пуль в чистом виде, а позднее — с небольшими (для твердости) примесями сурьмы, олова, цинка, меди и висмута. В позднейшее время пули осаливались или покрывались бумажными и другими обертками для предохранения от освинцевания стволов.

Эти свойства свинца с примесями отвечали задаче сообщения пуле вращательного движения и подбору необходимого веса и формы ее при имеющихся начальных скоростях (400—450 *м/сек*), давлениях и температурах.

При перевооружении образцами оружия с высокими начальными скоростями, особенно с появлением автоматического оружия, в котором температура нагрева стволов очень высока, выявилась полная непригодность свинца как материала ведущей части. Пули срывались с нарезов и имели неправильный полет, а от высоких температур ствола пули размягчались (плавились) и ложились вблизи оружия [1].

В результате решения задачи о материале для ведущей части пули появилось два вида пуль: 1) сплошные и 2) оболочечные.

---

[1] Про это явление говорят: „пулемет плюет"; оно наблюдается даже и у современных пулеметов, если стрельба ведется при перегретых стволах.

Сплошные пули изготовляются из однородного материала, который при относительно большом удельном весе должен быть пластичным для заполнения нарезов, удовлетворять требованиям минимального износа стволов, обладать противокоррозийностью и легко подвергаться механической и термической обработке.

Единственным представителем таких пуль является французская пуля D, изготовляемая из томпакового сплава. Томпак (латунь) — сплав меди и цинка, применяемый в технике с различными пропорциями этих металлов. Для пули D применяется сплав состава: меди — 90% и цинка — 10%. Пуля изготовляется холодной штамповкой и прессовкой. Томпаковые цилиндрики штампуются по форме пули с допуском, а затем прессуются до чертежных размеров, что улучшает однородность строения металла. Однако металл этот оказался пригодным только для принятой начальной скорости в 700 *м/сек*. По опытам, проведенным во Франции, уже при скоростях около 800 *м/сек* происходили срывы с нарезов. Для специальных пуль служит тот же томпак, а внутренность разделывается применительно к устройству специальной части.

Оболочечные пули состоят из оболочки, предназначенной для ведения пули по нарезам и размещения в середине ее сердечника или специальных устройств.

К материалу оболочки предъявляются требования пластичности, антикоррозийности и достаточной прочности. Материалом оболочки почти повсеместно служит мельхиор (сплав меди и никеля) или мягкие сорта железа (стали).

Для предохранения от коррозии и уменьшения износа стволов железные (стальные) оболочки плакируются, т. е. покрываются тонким слоем меди и ее сплавов. До войны 1914—1918 гг. применялись и другие материалы: красная медь (Португалия), никелированная сталь (Германия, Турция, Испания, Румыния) и ничем не покрытые стальные оболочки, кроме осалки (Австро-Венгрия).

После мировой войны экономические соображения заставили перейти почти повсеместно на железные плакированные оболочки.

Мельхиор оболочек наших пуль состоит из (ВСТ-13):

меди	78,5 — 80,5%
никеля	21,5 — 19,5%

Допускаются за счет никеля следующие примеси: железа не свыше 1%; случайных примесей не более 0,2%, в том числе марганца не свыше 0,1%; серы не свыше 0,01%; мышьяка не свыше 0,01%; фосфора не свыше 0,005%; свинца, сурьмы и висмута — следы (не более 0,002% каждого элемента). Механические качества пульного мельхиора, т. е. временное сопротивление разрыву R и относительное остаточное удлинение при разрыве i, должны быть: R — от 31,5 до 36,5 *кг/мм*^{2}; i — не менее 30%.

Вращение пули осуществляется благодаря врезанию в нарезы ее ведущей части; поэтому естественно, что *диаметр ведущей части должен быть больше калибра.*

Опытом установлено, что наилучшие результаты в смысле меткости и износа канала ствола получаются тогда, когда *диаметр ведущей части пули равен диаметру канала по дну нарезов.*

Из этих соображений верхний предел допуска на диаметр ведущей части назначают близким или равным диаметру по нарезам. Французская пуля устроена даже с некоторым форсированием, т. е. с превышением диаметра ведущей части пули над диаметром ствола по дну нарезов на 0,02 *мм*, что позволяют и конструкция и материал пули.

Для того чтобы при досланном в патронник патроне пуля была центрована, так как ведущая часть ее в нарезы не входит, у пулевого оружия устраивается специальный *пульный вход.*

Отношение диаметра пули к калибру для современных образцов оружия калибра 6,5 — 8 *мм* лежит в пределах:

$$\frac{d_1}{d} = 1{,}030 \div 1{,}040.$$

Из этого соотношения можно исходить и при расчете глубины нарезов для пулевого оружия.

Снарядам нарезной артиллерии в первый период их развития придавалось вращательное движение тем же способом, что и пулям.

Сначала на поверхности снаряда в специально разделанных продольных и поперечных желобах укреплялась (заливкой с последующей обработкой) толстая свинцовая оболочка, составляющая до одной пятой веса снаряда. Для снарядов, которые действовали по преградам, такой способ был очень несовершенным. Наличие желобов заставляло увеличивать толщину стенок и тем самым уменьшать полость снаряжения. Бывали также случаи срыва оболочки на полете. Коррозия чугуна под оболочкой вызывала поднятие ее; поэтому в мирное время снаряды хранились не облитыми свинцом. Сама оболочка тормозила проникновение снаряда в преграду.

В начале 1870 г. перешли к тонкой оболочке, припаиваемой к гладкой поверхности снаряда; вес оболочки составлял около $^1/_{15}$ веса снаряда. Однако этот способ был связан с большими производственными трудностями при массовом изготовлении (необходимость однообразия температур при погружении в ванну, на что влияла даже температура в мастерской).

Появление медного ведущего пояска относится к 1877 г., т. е. к периоду развития могущества нарезной артиллерии, вызванного франко-прусской войной 1870 г.

Ведущий поясок является сейчас основным средством сообщения снарядам вращательного движения. Главнейшие требования к пояску следующие:

1. Прочность пояска при выстреле и закрепление его на снаряде должны обеспечивать надежное и правильное вращательное движение.

2. Деформированный после прохождения нарезной части поясок не должен оказывать влияния на дальность и меткость стрельбы.

3. Размеры пояска, кроме надежного действия, должны обеспечивать малый износ канала и экономный расход меди.

4. Посадка не должна уменьшать прочности стенок снаряда.

Из этих требований и вытекают конструктивные данные и размеры пояска.

Материалом для пояска служит чистая красная медь. Опыты с более твердыми медными сплавами показали увеличение износа канала.

Для артиллерийских снарядов практикой установлено несколько форм поясков[1], простейшая из которых применяется для малокалиберных снарядов (см. рис. 36).

При назначении размеров пояска необходимо исходить из следующих соображений. В начале движения снаряда по каналу происходит врезание в нарезы, т. е. на пояске получается отпечаток нарезов. При вращательном движении снаряда поверхность грани пояска, прилегающая к боевой грани нареза, будет истираться (рис. 35). Выступ пояска, имеющий в начале врезания в нарезы по хорде у основания величину e, при приближении к дульному срезу делается более узким и принимает величину e_1. Величина выступа e_1 может стать такой, что произойдет срезание выступа и срыв снаряда с нарезов.

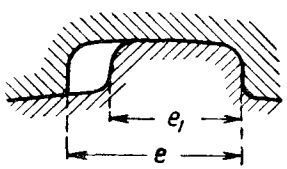


Рис. 35. Схема истирания пояска.

Поэтому ширина ведущего пояска b (в направлении оси снаряда) определяется из условия, чтобы истирание или изнашивание выступов было минимальным. Среднюю рабочую ширину пояска можно определить, если известны: сила реакции боевой грани на поясок S_N и допускаемое напряжение σ.

Напомним выражение, полученное при рассмотрении основных зависимостей внутренней балистики (см. стр. 29) для силы реакции боевой грани на выступ ведущего пояска S_N:

$$S_N = \frac{1}{n}\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \frac{P_i}{1+\nabla}\chi \cdot \operatorname{tg}\theta.$$

Для расчета пояска это выражение можно упростить следующим образом.

1. Коэфициент взаимодействия масс

$$\chi = 1 + \frac{m'}{M'} = 1 + \left(\frac{m + 0{,}5\,\mu}{M + 0{,}5\,\mu}\right)$$

[1] См. М. Г. Ефимов, Курс артиллерийских снарядов, Оборонгиз, 1939.

можно принять равным единице вследствие малости второго члена.

2. Коэфициент влияния нарезов ∇ можно принять: для малокалиберных снарядов $\nabla = 0{,}05$; при расчете ведущей части пуль $\nabla = 0{,}10$.

3. Отношение $\left(\frac{\rho}{r}\right)^2$, характеризующее распределение массы снаряда относительно его оси, колеблется в пределах:

для сплошных снарядов (пуль) 0,45
„ тонкостенных фугасных снарядов 0,60

Поэтому в формуле его можно заменить численными значениями. Если произвести эти замены, то формула для S_N примет вид:

$$S_N = (0{,}41 \div 0{,}57)\,\frac{P_i}{n}\,\operatorname{tg}\theta. \qquad (85)$$

Здесь нижние значения — для пуль, а верхние — для тонкостенных снарядов.

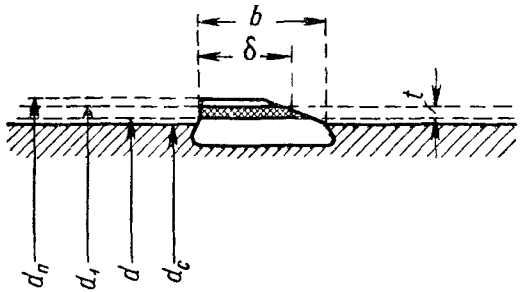


Рис. 36. Схема к расчету пояска.

По известным значениям S_N и допускаемому напряжению σ рабочей грани можно определить площадь одного рабочего выступа (рис. 36):

$$F = \frac{S_N}{\sigma}.$$

В свою очередь

$$F = \delta t, \qquad (86)$$

где δ — средняя рабочая ширина пояска;
t — рабочая высота пояска, равная глубине нарезов.
Отсюда

$$\delta = \frac{S_N}{\sigma t}. \qquad (87)$$

Максимальное значение σ обычно не превышает 3500 $кг/см^2$. При расчетах принято брать $\sigma = 3000$—3500 $кг/см^2$.

При напряжениях, не превышающих $\sigma = 3500$ *кг/см*^{2}, поясок работает нормально. Для снарядов больших калибров или при прогрессивной крутизне нарезки, когда может потребоваться несколько поясков, следует провести расчет и на работу трения.

Работа трения

$$dT_f = nfS_N\,dl,$$

где $f = 0{,}20$.

Тогда

$$T_f = f\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \frac{\chi \cdot \operatorname{tg}\theta}{1+\nabla}\int_0^{l_0} P_i\,dl = f\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \chi^2 \cdot \operatorname{tg}\theta\,\frac{mv_0^2}{2}.$$

Удельная работа трения, если i — число поясков, будет:

$$a = \frac{T_f}{int\delta} \leqslant 2000\ \textit{кгм/сек}^2. \qquad (88)$$

Ширина пояска по образующей корпуса снаряда принимается обычно из условия:

$$b = (1{,}1 \div 1{,}2)\,\delta.$$

Крепление пояска в корпусе снаряда должно исключать не только продольный сдвиг, но и вращение. Практикой выработана форма посадки пояска в виде кольцевого паза в продольном сечении снаряда, имеющего вид „ласточкина хвоста" (рис. 37).

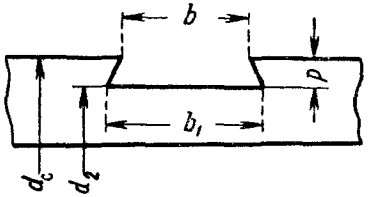


Рис. 37. Схема посадки пояска.

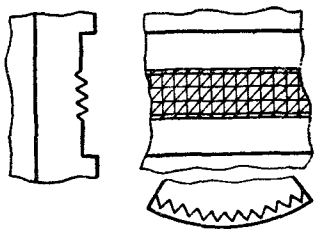


Рис. 38. Насечка для крепления пояска.

Глубина кольцевого паза p для малокалиберных снарядов лежит в пределах

$$p = (0{,}02 \div 0{,}03)\,d_c,$$

где d_c — диаметр снаряда в *мм* (по корпусу).

Дно паза для лучшего сцепления и во избежание вращения пояска обрабатывается в виде продольных или поперечных ребер или накатки (рис. 38).

Размер b_1 можно найти из выражения:

$$b_1 = b + [(d_c - \Delta) - d_2] \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где Δ — допуск диаметра снаряда; угол α обычно равен примерно 15°.

Можно b_1 принимать приближенно равным:

$$b_1 = 1{,}1\ b.$$

Большое значение имеет вопрос о диаметре пояска. При назначении диаметра пояска исходят из гипотезы о прорыве газовых струек через зазоры между ведущим пояском и поверхностью канала, вследствие чего получается усиленный износ канала. По этой причине почти всегда применяют пояски с форсированием, т. е. с диаметром бо́льшим, чем диаметр канала по нарезам. Обычно

$$d_п = 1{,}02 \div 1{,}03\ d_1.$$

В случае применения форсированных поясков на заднем их скате образуется бахрома от вытесненного металла. Наличие бахромы может оказывать существенное влияние на рассеивание снарядов, более значительное для снарядов малых калибров. Для сбора вытесненного металла за пояском иногда устраивается кольцевой желобок, служащий одновременно и для обжатия гильзы.

При выборе места расположения ведущего пояска следует исходить из подобных, зарекомендовавших себя на практике образцов. Обычно пояски располагают ближе к донной части, где стенки снаряда толще и они меньше ослаблены кольцевым пазом для пояска. При очень близком расположении к дну получается длинный патрон. Это, во-первых, невыгодно для работы автоматики и, во-вторых, требует упрочнения дульца гильзы во избежание выламывания при подаче.

Выбор места посадки пояска имеет большое значение и в отношении поведения снаряда в канале ствола. Дело в том, что снаряд движется по каналу с колебаниями вследствие того, что равнодействующая давления на дно снаряда редко совпадает с осью канала и обычно не проходит через центр дна. Этому способствуют недостаточно точная обработка пояска и положение снаряда в канале перед выстрелом. Появляется пара сил, стремящаяся вращать снаряд относительно его оси, что вызывает неправильное движение снаряда по каналу ствола.

Наивыгоднейшее положение и конструкция пояска обеспечивают плавное ведение снаряда по каналу.

Материалом для ведущих поясков служит электролитическая красная медь (ОСТ 309 и ОСТ 308) с временным сопротивлением разрыву $R = 30$ *кг/мм*^{2} и относительным удлинением $i = 40\%$. Примесей — спутников меди (висмута и сурьмы) — разрешается не больше 0,002%, так как они делают медь ломкой и хрупкой.

§ 15. О ВЕСАХ ПУЛЬ И СНАРЯДОВ

Выше неоднократно упоминались термины: „легкая“ и „тяжелая“ пуля (снаряд). Остановимся на них несколько подробнее.

Выбор веса пули или снаряда определяется тактическим назначением данного вида оружия, а на основе балистического решения подбирается наивыгоднейшее сочетание элементов пули или снаряда.

Из внешней балистики известно, что, при одном и том же калибре пули с бо́льшим весом (поперечной нагрузкой) имеют меньшую начальную скорость, но на больших дальностях, вследствие меньшей потери скорости, имеют лучшие балистические качества у цели (меткость, отлогость траектории).

Наоборот, пули с меньшим весом (меньшей поперечной нагрузкой), но с большей начальной скоростью, имеют лучшие балистические качества у цели на малых дальностях.

На основе этих балистических свойств и установилась форма тактического применения оружия и смысл понятий „легкая“ и „тяжелая“ пуля.

Французы, первые начавшие перевооружение пулей D, назначив ей при 8-*мм* калибре относительно большой вес — 12,8 *г* (поперечная нагрузка 25,58 *г/см*^{2}) и начальную скорость только 700 *м/сек*, исходили из весьма компромиссных соображений. Они полагали, что можно несколько поступиться балистическими данными, в частности отлогостью траектории на малых и средних дальностях, но иметь преимущество перед противником на больших дальностях.

Немцы почти при одном и том же калибре — 7,92 *мм* приняли другое решение, назначив вес пули 10 *г* (поперечная нагрузка — 20,33 *г/см*^{2}) при начальной скорости ее 895 *м/сек*; таким образом, они исходили из соображения основного применения пули на малых и средних дальностях. Этим решением подчеркивалась наступательная доктрина.

Патроны тогда предназначались для винтовок (пулеметы только начали появляться); поэтому второе решение, безусловно, было более правильное, так как при легкой пуле получаются два несравненных преимущества:

1) большая дальность прямого выстрела;

2) увеличение носимого стрелком боекомплекта патронов.

Дальность прямого выстрела, т. е. такая горизонтальная дальность, на которой траектория пули поднимается настолько, что на всем ее протяжении пуля поражает цель, является весьма важным фактором.

В бою, в период сближения с противником, надо освободить стрелка от необходимости устанавливать прицел, дать ему возможность пользоваться постоянной установкой прицела. Для этого необходима настильная траектория, которой обладает легкая пуля.

Например, для нашей винтовки требуется, чтобы при дальности 400 *м* на всем протяжении поражалась живая цель —

лежащий стрелок (высота 35—40 *см*). По этой же причине авиационные пулеметы при постоянной установке прицела пристреливаются на дальности 200—400 *м*.

Эти две доктрины — французская и немецкая — были положены в основу перевооружения всех армий.

С развитием пулеметного вооружения, значительным насыщением им войсковых частей и с применением огня на больших дальностях стали сильно ощущаться слабые свойства легких пуль. Началось довооружение тяжелыми пулями.

Так, в Германии была введена тяжелая пуля SS (Schweres Spitzgeschoss — тяжелая остроконечная), у нас — тяжелая пуля образца 1930 г., в Испании — тяжелая пуля PP (pesada puntiaguda — тяжелая остроконечная) и др.

Французы, наоборот, связанные своей тяжелой пулей, не годной для вооружения авиации, ввели для авиационных пулеметов другой калибр — 7,5 *мм* и легкую пулю.

Для авиации, где дистанции боя незначительны и большие угловые перемещения самолета требуют больших начальных скоростей, легкие пули применяются как основные.

Сравнительной весовой характеристикой пуль и снарядов служит их относительный вес, или коэфициент веса, выражаемый отношением:

$$c_q = \frac{q}{d^3},$$

где c_q — коэфициент веса;
q — вес пули (снаряда) в *г*;
d — калибр оружия в *см*.

Интересно отметить, что численные значения коэфициента веса c_q и поперечной нагрузки A при калибрах около 7,8 *мм* близки между собой. Действительно, поперечная нагрузка

$$A = \frac{q}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4d}{\pi} \cdot \frac{q}{d^3} \; г/см^2; \tag{90}$$

коэфициент веса

$$c_q = \frac{q}{d^3} \; г/см^3;$$

следовательно,

$$A = \frac{4d}{\pi} c_q.$$

Равенство $A = c_q$ будет соблюдено при $\frac{4d}{\pi} = 1$, откуда

$$d = 0{,}782 \; см, \text{ или } 7{,}82 \; мм;$$

при $d > 7{,}82$ *мм* и $c_q = \text{const}$ $A > c_q$.

Таким образом, при калибрах свыше 7,82 *мм* поперечная нагрузка по численному значению всегда больше коэфициента веса при одинаковых значениях c_q.

В таблице к рис. 41 приведены весовые данные некоторых пуль. На основании этих данных можно сделать выводы об отнесении пуль к той или иной весовой группе. Как видно, японская пуля калибра 6,5 *мм* имеет высокий коэфициент веса: $c_q = 36 \div 38$.

Японская пуля — остроконечная, но для данного типа она тяжела, что можно видеть из сравнения с тяжелой испанской пулей.

Для калибров 7,5 — 8 *мм* $c_q = 20 \div 26$, а для калибров 11 — 14 *мм* $c_q = 18 \div 24$.

Для малокалиберных снарядов наивыгоднейшие веса лежат в пределах $q = 16 \div 18\, d^3$.

Коэфициент веса является очень удобной характеристикой, так как по нему можно: отнести пулю или снаряд к той или иной весовой группе, проверить правильность веса, выбранного для данного калибра или для вновь проектируемого образца.

Примеры

1. При составлении тактико-технических требований на вновь проектируемую пушку калибра 23 *мм* необходимо назначить ориентировочные веса.

Для данных калибров $q = 16 \div 18\, d^3$, поэтому

$$q = (16 \div 18)\, 2{,}3^3 = 194 \div 219 \text{ г}.$$

2. Подана для испытаний 20-*мм* пушка со снарядом весом $q = 92$ *г*.

Коэфициент веса

$$c_q = \frac{q}{d^3} = \frac{92}{2^3} = 11{,}5,$$

т. е. снаряд заведомо очень легок, и при испытаниях необходима более тщательная проверка балистики на таких дальностях, как 600—1 000 *м*.

§ 16. ВНУТРЕННЕЕ УСТРОЙСТВО ПУЛЬ

А. ОБЫКНОВЕННЫЕ ПУЛИ

На рис. 39—41 изображено несколько типичных образцов пуль и приведены их характеристики.

Принятые в СССР обыкновенные пули бывают трех видов: легкая образца 1908 г. с мельхиоровой оболочкой, легкая образца 1908 1930 гг. с железной плакированной оболочкой и тяжелая пуля образца 1930 г. (рис. 39).

Как интересную деталь легких пуль, следует отметить коническое углубление в дне, которое служит для расширения хво-

стовой части пули при действии газов и тем самым способствует лучшему врезанию пули в нарезы и улучшению меткости (предложено специальной комиссией по выработке пули 1906—1908 гг.).

Конструкция тяжелой пули образца 1930 г., предназначенной для стрельбы из пулеметов на большие дальности, как видно на рис. 39, *в*, имеет наивыгоднейшую форму — коническую хвостовую и большую оживальную части.

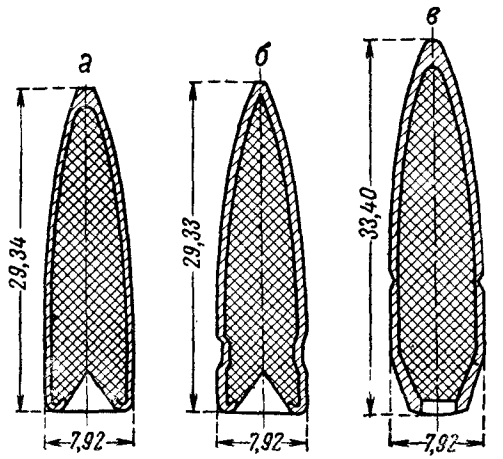


Рис. 39. Обыкновенные пули СССР:
а—легкая образца 1908 г.; *б*—легкая образца 1930 г.; *в* — тяжелая образца 1930 г.

Калибр в *мм*	7,62	7,62	7,62
Вес пули в *г*	9,6	9,6	11,8
Поперечная нагрузка в *г/см*^{2} . .	21,2	21,2	25,8
Коэфициент веса в *г/см*^{3}	21,7	21,7	26,7
Длина пули в калибрах (средняя)	3,82	3,82	4,47
Скорость на 25 *м* в *м/сек* . . .	847	847	790

Конструкции пуль немецких S и SS, американской М-1 1926 г. и испанской РР не имеют особенностей, на которые следовало бы обратить внимание (рис. 40 и 41). Американская пуля (рис. 41,*б*) — одна из лучших в балистическом отношении (коэфициент формы $i = 0{,}42$). Это является результатом очень большой опытной работы и жестких производственных требований.

Английская пуля MVII (рис. 41,*а*) характерна тем, что сердечник ее — составной: задняя часть, как и обычно, свинцовая, а впереди расположен более легкий материал — алюминий или фибра, благодаря чему центр тяжести пули перенесен назад[1]. Это сделано для того, чтобы при переходе к остроконечным пулям крутизна нарезов в оружии оставалась прежней, а для устойчивого положения пули на полете необходимо было подобрать соответствующее распределение масс (см. § 21). Для этого у японской пули Арисака, как видно на рис. 41,*г*, мельхиоровая (легкая) оболочка в головной части сделана более толстого

[1] Во время мировой войны 1914—1918 гг. встречались пули, у которых в головной части были запрессованы тряпки, очевидно для удешевления.

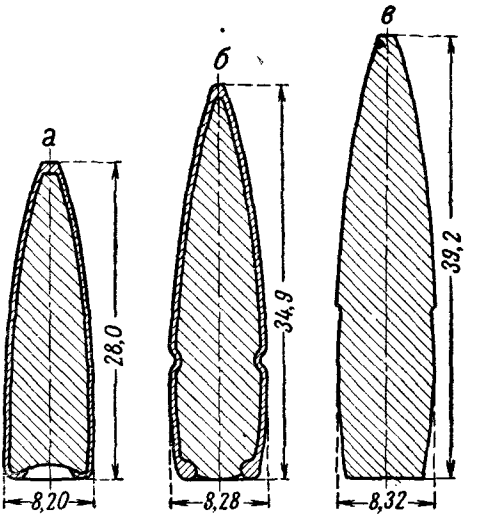


Рис. 40. Обыкновенные пули:
а и *б* — легкая S и тяжелая SS (Германия); *в* — тяжелая D (Франция).

Калибр в *мм*	7,92	7,92	8,0
Вес пули в *г*	10,0	12,85	12,7
Поперечная нагрузка в *г/см²*	20,4	26,2	25,3
Коэфициент веса в *г/см³*	20,0	25,8	25,0
Длина пули в калибрах (средняя)	3,5	4,26	4,9
Начальная скорость в *м/сек*	895	785	700

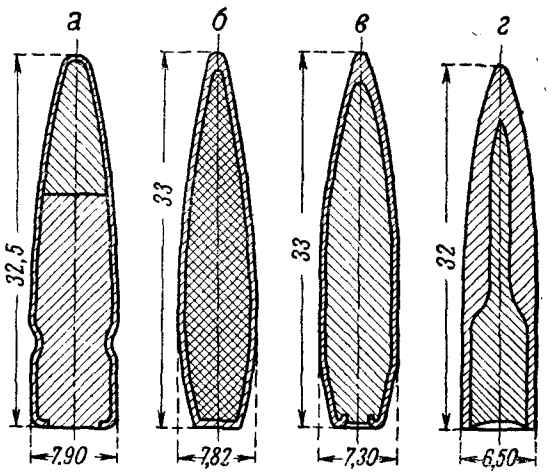


Рис. 41. Обыкновенные пули:
а — средняя MVII (Англия); *б* — средняя М-1 1926 г. (США); *в* — тяжелая PP (Испания); *г* — тяжелая Арисака (Япония).

Калибр в *мм*	7,71	7,62	7,0	6,5
Вес пули в *г*	11,27	11,11	9,95	9,0
Поперечная нагрузка в *г/см²*	24,0	24,4	26,0	27,1
Коэфициент веса в *г/см³*	24,6	25,0	28,8	32,7
Длина пули в калибрах (средняя)	4,22	4,32	4,72	4,92
Начальная скорость в *м/сек*	745	825	872	760

сечения. Все приведенные пули — оболочечные, с сердечником из чистого свинца или с добавлением сурьмы (до 2%) для твердости.

О французской сплошной пуле D выше, по существу, уже сказано все.

Б. БРОНЕБОЙНЫЕ ПУЛИ

Устройство почти всех образцов бронебойных пуль одинаковое и состоит в том, что стальной бронебойный сердечник запрессован в одну или, чаще, в две оболочки. Наружная оболочка — как и у обыкновенных пуль, а внутренняя — из мягкого металла: меди или свинца.

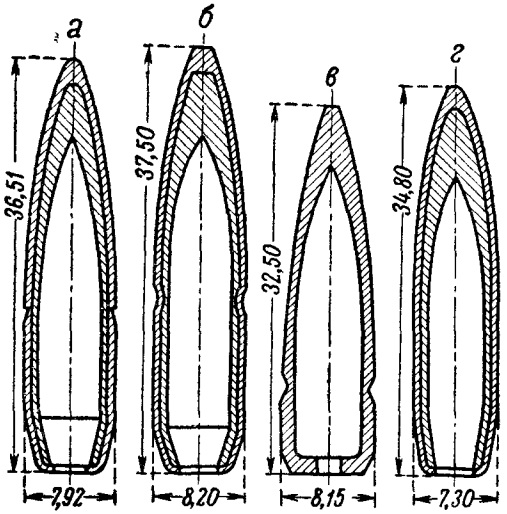


Рис. 42. Бронебойные пули: *а* — образца 1930 г. (СССР); *б* — SmK (Германия); *в* — P (Франция); *г* — P (Испания).

Калибр в *мм*	7,62	7,92	8,0	7,0
Вес пули (средний) в *г*	10,6	11,55	9,6	8,9
Поперечная нагрузка в *г/см²* . .	23,2	23,5	19,1	23,2
Коэфициент веса в *г/см³*	24,0	23,4	18,7	26,0
Начальная скорость в *м/сек* . .	795—810	815	800	820
Длина пули в калибрах	4,65	4,7	4,06	4,96

Мягкая внутренняя оболочка предназначается для того, чтобы при движении по нарезной части деформации наружной оболочки не передавались непосредственно твердому стальному сердечнику и тем самым исключалось действие его на нарезы и преждевременный их износ.

На рис. 42 приведены устройства и данные бронебойных пуль, не требующие особых пояснений: русская образца 1930 г., немецкая SmK (Spitzgeschoss mit Stahlkern), французская P (Perfonante) и испанская P.

Как видно на рис. 42, *в*, французская пуля P имеет только одну оболочку, ввиду того что вообще во Франции принят томпаковый сплав для пуль. Толщина оболочки бо́льшая, и деформации при действии нарезов распространяются только по ее

толщине. Остальные пули — с двумя оболочками. Какое значение имеет внутренняя мягкая оболочка для ведущей части, было уже указано.

В головной части всех пуль оболочка большей толщины и по форме напоминает наконечник.

Наличие такого наконечника из вязкого металла (перед бронебойным сердечником у пуль или перед корпусом у бронебойных снарядов) имеет большое значение для бронепробиваемости. В 90-х годах прошлого века в России на морском полигоне испытывались специальные броневые плиты, изготовленные заводом Гарвея (Америка). Эти плиты были цементированы таким образом, что содержание углерода прогрессивно уменьшалось от поверхности к внутренним слоям. Оказалось, что такая броня не пробивалась, и снаряды разбивались о нее на мелкие осколки. Руководитель опытов — известный и крупнейший специалист морского флота адмирал Макаров — предложил снабдить снаряды наконечником из металла более вязкого, чем корпус. Мысль Макарова сводилась к тому, что наконечник предохранит головную часть снаряда от раскалывания в начальный момент удара. При установке латунного наконечника сразу получился разительный эффект: снаряды начали пробивать броню Гарвея, причем корпус снарядов не разрушался.

„Макаровский наконечник" повсюду твердо вошел в конструкцию бронебойных снарядов.

Позднейшими опытами было установлено, что материалом для наконечника может служить и сталь, но более вязкая, чем для корпуса.

Не останавливаясь на объяснении сущности действия „макаровского наконечника", а также на его устройстве [1], укажем, что принцип этот применен и в бронебойных пулях.

Следует отметить, что развитие бронебойных пуль находится все время в противоречии с развитием толщины и качества брони. Поэтому бронебойные данные указанных пуль чисто иллюстративные.

Укажем нормы на бронепробиваемость для проб при приемке.

Для нашего патрона требуется, чтобы 7-*мм* броневой щит твердостью по Бринеллю 490—530 на дальности 400 *м* пробивался. Эти же пределы пробиваемости имеют и другие пули. Так, испанская пуля Р пробивает 10-*мм* хромоникелевую броню твердостью по Бринеллю 400 на дальности 100 *м*.

В. ТРАССИРУЮЩИЕ ПУЛИ

Трассирующие пули оставляют на полете дымовой или световой след, по которому можно вести наблюдение за результатами стрельбы.

---

[1] См. М. Г. Ефимов, Курс артиллерийских снарядов, Оборонгиз, 1939.

На рис. 43 изображено типовое устройство трассирующих пуль: СССР — образца 1930 г., английской SPGA и французской Т.

Устройство первых двух пуль (рис. 43, *а* и *б*) следующее. В обычной оболочке помещены: спереди — свинцовый сердечник, а затем стаканчик с запрессованным трассирующим составом. У нашей пули сзади стаканчика установлено кольцо, и затем все закреплено загнутой частью оболочки; у английской пули стаканчик закрыт непосредственно загнутой оболочкой; у французской пули (рис. 43,*в*)—сплошной томпаковой—в задней части рассверлено отверстие, куда помещен трассирующий состав, дно прикрыто латунным кружком, и край оболочки завернут. У нашей пули образца 1930 г. и французской Т за трассирующим составом помещена небольшая навеска воспламенителя.

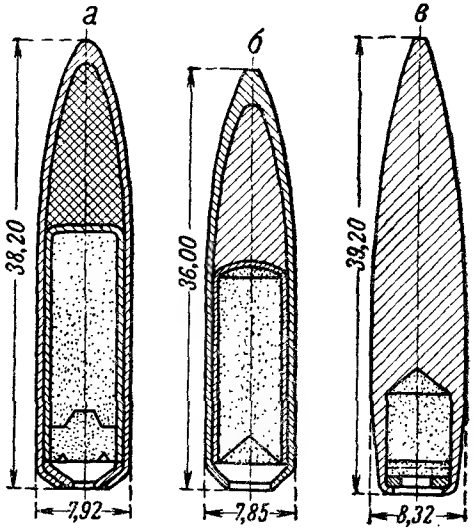


Рис. 43. Трассирующие пули: *а* — Т-30 (СССР); *б* — SPGA (Англия); *в* — Т (Франция).

Калибр в *мм*	7,62	7,71	8,0
Вес пули (средний) в *г*	9,4	10,5	11,2
Длина пули в калибрах	4,97	4,68	4,9
Поперечная нагрузка в *г/см*^{2} . .	21,0	22,6	22,3
Коэфициент веса в *г/см*^{3}	21,2	22,8	21,9
Начальная скорость в *м/сек* . .	790—815	770	750

Длина трассы для современных пуль доходит до 1 500 *м*. В трассирующие составы входят обычно компоненты, которые дают различную окраску трассы. Кроме того, составы содержат вещества, богатые кислородом и легко воспламеняющиеся, с добавлением замедлителей горения.

В некоторых ранних образцах английских пуль SPGA трассирующий состав состоял из перекиси бария BaO_2 — 90% и порошкообразного магния Mn — 10%.

Время горения состава незначительно, и трасса видна на дальности до 600 *м*. В более поздних образцах известно при-

менение состава из бариевой селитры $Ba(NO_3)_2$ и различных смол, который давал видимый дымовой след белого цвета до 1 000 *м*.

Для французской пули Т применяются составы, один из которых идентичен приведенному английскому с белым (дымовым) следом, а другой — с красной окраской трассы, вследствие наличия в составе магния и нитрата стронция. Зажигательная часть состава состоит из сурика и магнезии.

При подборе трассирующего состава, а также и запрессовке его необходимо добиваться горения состава параллельными слоями, чтобы избежать выгорания с одного бока, в результате чего получается неправильный полет. Во время стрельбы трассирующими пулями можно иногда наблюдать, как пуля резко меняет направление движения в сторону („срывается с траектории").

Г. ЗАЖИГАТЕЛЬНЫЕ ПУЛИ

Развитие зажигательных пуль шло в основном в направлении использования их по воздушным целям (самолетам, аэростатам).

Из опыта последних войн в Испании, Китае и других странах выяснилось, что зажигательные пули — наиболее действительное средство в воздушном бою.

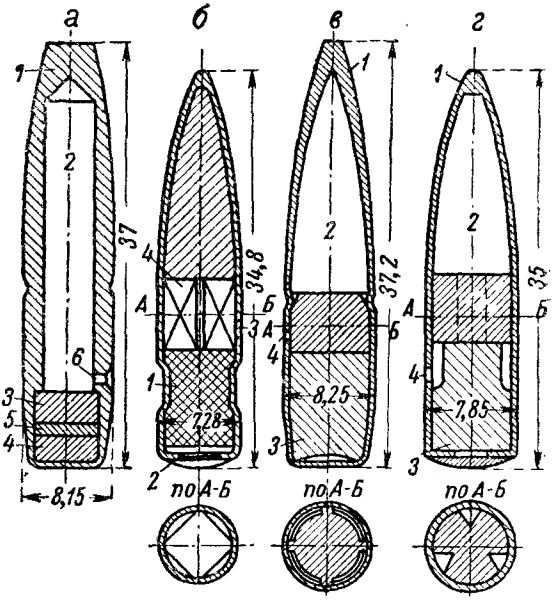


Рис. 44. Зажигательные пули:
а — Ph (Франция); *б* — P (Испания); *в* — SPr (Германия); *г* — SA (Англия).

Калибр в *мм*	8,0	7,0	7,92	7,71
Вес пули в *г*	12,8	8,0	9,54	10,05
Длина пули в калибрах . .	4,61	4,97	4,70	4,4
Поперечная нагрузка в *г/см²*	25,5	20,8	19,8	21,8
Коэфициент веса в *г/см³* . .	25,0	23,4	19,4	21,5
Начальная скорость в *м/сек*	750	870	870	—

На рис. 44 приведено четыре образца зажигательных пуль: французская Ph (Phosphore), испанская P, германская SPr и английская SA.

Устройство и действие первых двух (рис. 44, *а* и *б*) несколько отличны от остальных. У этих пуль зажигательный состав (фосфор) начинает вытекать сразу по вылете их из канала ствола. Соединяясь с кислородом воздуха, фосфор горит и дымит на полете, оставляя след, по которому можно наблюдать за результатами стрельбы. При попадании в цель остатки фосфора воспламеняют ее. Так как зажигательного состава у этих пуль хватает на горение на протяжении 600 *м*, то, очевидно, применять их можно на короткие дальности — 300—400 *м*, чтобы оставшегося состава хватило для воспламенения цели.

В германских и английских пулях (рис. 44, *в* и *г*) зажигательный состав вытекает только после удара о преграду и, следовательно, от дальности стрельбы не зависит.

У пули Ph (рис. 44, *а*) обычная для французских пуль томпаковая оболочка *1* снабжена почти по всей длине каналом *2*, который наполнен белым фосфором в количестве 0,8 *г*. Сзади поставлены два диска: верхний *3* — латунный и нижний *4* — оловянный, с густой лаковой прокладкой *5* между ними. В корпусе пули имеется очко *6* для выхода фосфора, запаянное сплавом Дарсе (свинца — 5 частей, висмута — 8 частей, олова — 3 части). Во время выстрела сплав Дарсе при температуре 94° плавится и открывает очко. Фосфор, расплавленный уже при температуре 80°, на полете выходит через очко и, окисляясь кислородом воздуха, начинает гореть, оставляя дымовой след, а при попадании в цель воспламеняет ее. Фосфора хватает на горение по трассе до 600 *м*.

Головная часть сильно усечена, для того чтобы замедлить прохождение среды цели (тонкая обшивка самолета) и обеспечить воспламенение.

У испанской зажигательной пули (рис. 44, *б*) фосфор *1* помещен в задней части, ввиду чего это — единственная испанская пуля без конической хвостовой части. Дно пули *2* и боковое отверстие *3* запаяны легкоплавким сплавом. В средней части помещено четырехгранное свободное тело *4*. При выстреле этот сплав расплавляется, а свободное тело, оседая назад, выдавливает через отверстия фосфор, который, соединяясь с кислородом воздуха, горит и оставляет белый дымовой след. При ударе о преграду оставшийся фосфор воспламеняет ее. Горение продолжается также на трассе около 600 *м*.

Германская пуля SPr и английская SA устроены и действуют по общему принципу, отличаясь лишь деталями. У этих пуль (рис. 44, *в* и *г*) в оболочке *1* помещен белый фосфор *2*. В задней части вставлена свинцовая пробка *3*, к которой прилегает свободным концом цилиндрик с продольными каналами (см. разрез по *АБ*) для прохода фосфора. Боковое отверстие *4* залито легкоплавким сплавом, который плавится уже по вылете пули из канала ствола. При ударе о преграду свободный цилиндрик, по инерции продвигаясь вперед, выжимает фосфор через каналы и боковое отверстие.

Зажигательные пули требуют особых условий хранения и снаряжения магазинов. Легкоплавкость сплавов, закрывающих выходные отверстия, или выпадение заливки при ударах могут повлечь выделение фосфора; поэтому такие пули хранят в жестких герметических ящиках, и обращение с ними должно быть особо осторожное.

Д. ПРИСТРЕЛОЧНЫЕ (РАЗРЫВНЫЕ) ПУЛИ

Пристрелочные пули подразделяются на два вида: *дистанционные,* разрывающиеся по истечении определенного промежутка времени, и *ударные,* разрывающиеся только после встречи с преградой.

Устройство этих пуль сложно, так как в сравнительно малый объем приходится помещать механизмы действия и безопасности.

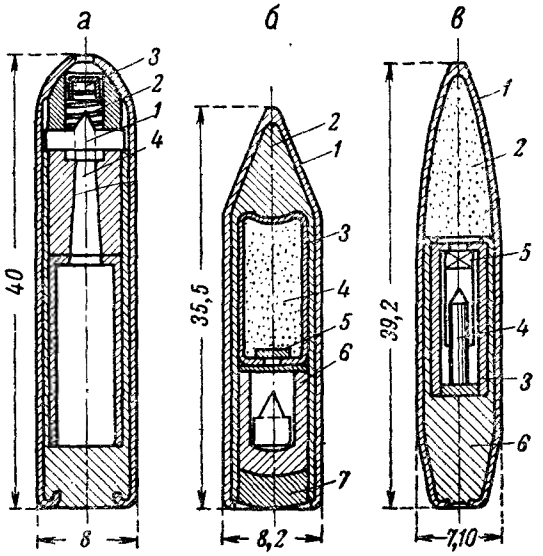


Рис. 45. Пристрелочные (разрывные) пули:
а и *б* — дистанционная и ударная (Германия); *в* — ударная (Испания).

На рис. 45 изображено устройство германской пули дистанционного действия, а также германской и испанской пуль ударного действия.

В головной части германской дистанционной разрывной пули (рис. 45, *а*) неподвижно закреплен ударник *1*, над жалом которого помещена спиральная пружина *2*, упирающаяся одним концом в основание жала ударника; сверху на ней лежит капсюль гремучей ртути *3*. В теле ударника имеется сквозной канал *4* для передачи огня медленно горящим составом в пороховую камору. С началом движения пули по каналу ствола капсюль, вследствие инерции стремясь остаться на месте, сжимает пружину и натыкается на жало, в результате чего и происходит воспламенение.

Сжатию пружины способствует также действие силы сопротивления воздуха, который проникает через специальное голов-

ное отверстие. Огонь от капсюля передается медленно горящему составу, который горит около 4—5 секунд; затем огонь передается в пороховую камору с черным порохом. Последний, разрывая стенки корпуса пули, создает облачко дыма, по которому можно судить о средней точке разрыва при стрельбе по воздушным целям. При попадании в аэростат пуля проникает внутрь оболочки, разрывается и осколками пробивает ткань; газ вытекает через пробоины.

Дальность действия пули незначительна — 350—500 *м*.

Устройство и действие германской разрывной пули ударного действия (рис. 45, *б*) следующее. В оболочку *1* пули из плакированной стали впрессован свинец *2*, заполняющий коническую часть и образующий рубашку по всей длине пули. В верхнюю часть свинцовой рубашки вставлены: стаканчик *3* с запрессованным взрывчатым составом *4* и капсюль *5*. В задней части вставлен другой стаканчик из мягкой стали *6*, в котором находится ударник с жалом. За стаканчиком запрессован свинцовый кружок 7. Во время выстрела ударник плотно прижат к стенкам и дну стаканчика. При ударе о преграду ударник по инерции продвигается вперед, разбивает капсюль, и пуля разрывается.

Как видно, вопрос безопасности пули не совсем разрешен, так как движение ударника вперед при случайных падениях пули тормозится только силой трения наружной поверхности ударника о внутреннюю поверхность стаканчика.

Устройство испанской пули ударного действия (рис. 45, *в*), более совершенной по конструкции, состоит в следующем. В головную часть оболочки из плакированной стали или мельхиора *1* запрессован дымообразующий разрывной заряд *2*. В гильзу *3* вставлены: капсюль *5* гремучей ртути, стальной ударник *4*, закрепленный в латунном предохранителе, работающем на принципе силы трения, и свинцовый сердечник *6*.

Пуля безопасна при перевозке и обращении, что проверяется бросанием ее на стальной лист с высоты 5 *м*.

Е. ПУЛИ КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ

На рис. 46 приведены образцы пуль комбинированного действия: французская TP, германская SmKL и испанская P — бронебойно-трассирующие пули и бронебойно-зажигательно-трассирующая пуля (по патенту).

Французская пуля TP предназначена была под авиационные пулеметы Виккерса и Льюиса, состоящие на вооружении во Франции и калибр которых сохранился английский — 7,71 *мм*. Светящий состав — перекись стронция, магний и соль стронция щавелевой кислоты. Воспламенитель — обычный сурик и магнезия. След трассы — красный, хорошо видимый днем.

Германская пуля SmKL состоит из плакированной оболочки мягкой стали, свинцовой с примесью сурьмы рубашки, бронебойного сердечника из вольфрамовой стали, стаканчика из мяг-

кой стали с трассирующим и воспламенительным составом и донного кружка. Видимость трассы — до $^3/_4$ секунды; цвет — ярко-красный.

Испанская пуля Р имеет такое же устройство, как и германская, отсутствует только воспламенитель. Длина светящейся трассы — до 1 000 *м*. Бронебойное действие — на дальности 100 *м* пробивается лист хромоникелевой стали толщиной 6 *мм* с твердостью по Бринеллю 500.

Устройство бронебойно-зажигательно-трассирующей пули ясно из рисунка 46, *г* и пояснений не требует.

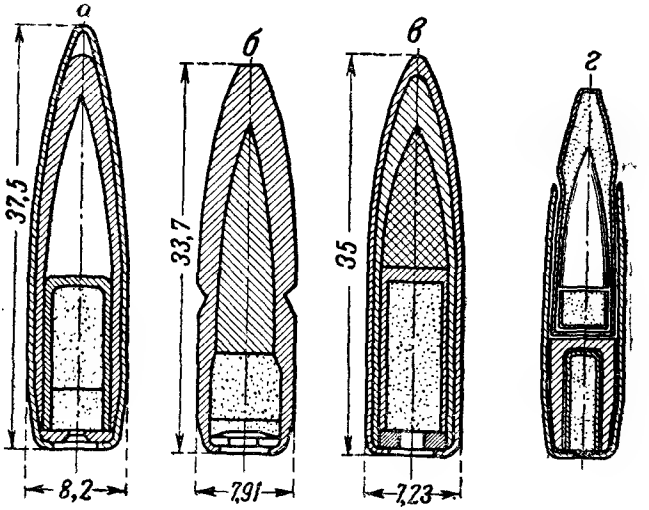


Рис. 46. Пули комбинированного действия:
а — SmKL (Германия); *б* — TP (Франция); *в* — P (Испания); *г* — тройного действия.

Калибр в *мм*	7,92	7,71*	7,0	—
Вес пули в *г*	10,34	9,2	7,6	—
Длина пули в калибрах	4,12	4,37	5,0	—
Поперечная нагрузка в *г/см*^{2}	21,0	20,0	19,4	—
Коэфициент веса в *г/см*^{3}	20,6	20,2	22,1	—
Начальная скорость в *м/сек*	860	—	880	—

§ 17. УСТРОЙСТВО МАЛОКАЛИБЕРНЫХ СНАРЯДОВ

А. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основное требование, которое предъявляется к снарядам авиационных пушек, — наибольшее разрушающее действие при попадании в цель — удовлетворяется правильным подбором и взаимодействием трех основных элементов: корпуса, взрывчатого вещества (ВВ) и взрывателя.

Критерием могущества снарядов и отчасти характеристикой их устройства служат:

1) коэфициент веса снаряда

$$c_q = \frac{q}{d^3};$$

* Под авиационный образец Льюиса.

2) коэфициент наполнения

$$\alpha = \frac{\omega}{q} 100\%;$$

3) коэфициент веса заряда

$$c_\omega = \frac{\omega}{d^3},$$

где q — вес окончательно снаряженного снаряда в *г*;
ω — вес заряда в *г*;
d — калибр оружия в *см*.

Устройство снаряда и прочность его элементов находятся в тесной связи с перечисленными коэфициентами.

Б. ОСКОЛОЧНЫЕ СНАРЯДЫ

Осколочные снаряды являются основными в боевом комплекте авиационных пушек.

К устройству осколочного снаряда и его корпуса предъявляются следующие основные требования: наибольшее число поражающих (убойных) осколков, наибольшие величина убойного интервала и плотность поражения.

Осколочные малокалиберные снаряды представляют собой по существу снаряды осколочно-фугасные, так как при действии разрывного заряда корпус снаряда дробится на осколки, которые имеют определенную скорость, и в то же время расширяется область поражения благодаря действию взрывной волны.

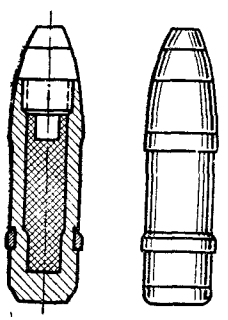


Рис. 47. Осколочный снаряд.

Мерой убойного действия осколка служит характер поражения. Убойными считаются осколки весом свыше 5 *г*, так как они поражают вблизи места разрыва экипаж, баки, радиатор и т. п. Если принять во внимание скорость осколка, то убойным он будет тогда, когда в момент удара по живой цели он имеет кинетическую энергию 8 — 10 *кгм*.

Частичные повреждения прочных частей самолета: лонжеронов, нервюр, цилиндров моторов воздушного охлаждения и пр., причиняют осколки весом не менее 20 *г* при разрыве снаряда в непосредственной близости. Существенным же образом эти части повреждаются преимущественно при прямом попадании.

Таким образом, дробление снаряда на осколки весом 5—20 *г* есть основное условие устройства осколочного снаряда.

Корпус таких снарядов (рис. 47) изготовляется обычно из прокатанных цилиндров. Технологический процесс очень прост, так как требуется только обточка и сверловка на токарном

станке. Толщина стенок корпуса лежит в пределах 0,17—0,25 калибра.

Характеристики осколочных снарядов следующие:

$$c_q = 16 \div 18;$$

$$\alpha = \frac{\omega}{q} 100\% = 5 \div 10\%;$$

$$c_\omega = \frac{\omega}{d^3} = 1{,}0 \div 1{,}5.$$

В осколочных снарядах применяется, как правило, головной взрыватель мгновенного действия.

В. БРОНЕБОЙНЫЕ СНАРЯДЫ

В связи с развивающейся тенденцией бронирования жизненных частей самолета, а также опытом применения по наземным броневым целям (танкам, бронемашинам и т. п.) бронебойный или комбинированного действия (бронебойно-зажигательный) снаряд приобретает особое значение в боекомплекте самолетов.

Для надежного бронебойного действия снаряд должен обладать: высокой прочностью корпуса, чтобы преодолевать сопротивление преграды, взрывчатым веществом, которое не самовзрывалось бы при ударе снаряда о преграду, и донным взрывателем с замедлением. Толщина стенок корпуса бронебойных снарядов колеблется в пределах 0,17 — 0,25 калибра.

Внутренняя полость для ВВ разделывается только до центрующего утолщения; головная часть — сплошная.

Характеристики бронебойного снаряда:

$$c_q = \frac{q}{d^3} = 16 \div 20;$$

$$\alpha = \frac{\omega}{q} 100\% = 1{,}2 \div 3{,}0\%;$$

$$c_\omega = 0{,}15 \div 0{,}30.$$

Устройство и действие специальных снарядов — зажигательных или комбинированного действия — сходны с аналогичными пулями, и на них останавливаться не будем.

§ 18. ВЗРЫВАТЕЛИ

Взрыватели, применяемые для стрельбы по воздушным целям, должны обладать большой чувствительностью и мгновенным действием.

Под чувствительностью взрывателя понимается действие его при ударе о преграду малого сопротивления. Мерой чувстви-

тельности для взрывателей, применяемых по воздушным целям, служит действие по бумаге толщиной 1 *мм* или по ткани, идущей на обшивку самолетов.

По месту расположения в снаряде взрыватели мгновенного действия, очевидно, могут быть только головные. Принцип действия их основан на использовании реакции преграды в момент удара. Конструктивно это оформлено так, что преграду (цель) встречает первым ударник своей головкой или мембрана, которая прикрывает головку ударника от действия силы сопротивления воздуха на полете.

При встрече с преградой ударник от реакции последней продвигается к капсюлю и своим жалом накалывает его, вследствие чего происходит взрыв.

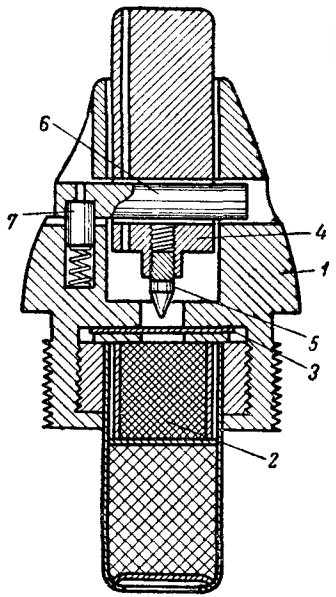


Рис. 48. Взрыватель головной, мгновенного действия.

Взрыватели непосредственно цель не поражают и, следовательно, в этом смысле являются непроизводительным грузом. Отсюда стремление создать взрыватель как можно меньшего веса и размеров, что достигается упрощением конструкции.

Все взрыватели рассматриваемого назначения — непредохранительного типа, т. е. капсюль-детонатор не изолирован от жала предохранительным устройством. Такой тип взрывателя представляет некоторую опасность при обращении со снарядами и особенно во время выстрела, когда вся ударная система может притти в действие.

Рассмотрим устройство некоторых типов взрывателей, применяемых для стрельбы по воздушным целям.

Взрыватель, применяемый в снарядах калибра 20—23 *мм* автоматической пушки „Мадсен“, — стержневой, мгновенного действия (рис. 48).

В корпусе взрывателя *1* имеется продольный цилиндрический канал, в дне которого расположен капсюль-детонатор *2*. Капсюль прикрыт предохранительной пластинкой *3*. В канале корпуса помещен стержневой ударник *4* с жалом *5*. Ударник представляет собой пустотелый алюминиевый цилиндр, что объясняется необходимостью уменьшения его массы для повышения чувствительности. Головка ударника выходит наружу взрывателя и первая встречает преграду.

В поперечный канал корпуса ударника вставлена чека *6*, служащая предохранителем от наскакивания ударника жалом на капсюль при обращении и при выстреле. Чека удерживается от выпадения стопором *7*, поджатым пружиной.

При выстреле стопор *7* благодаря инерции сжимает предохранительную пружину и оседает, освобождая предохранитель-

ную чеку *6*. Чека под действием центробежной силы перемещается в сторону стопора, до упора своей уширенной частью в стенку ударника. Вследствие этого стопор, поднимающийся к моменту вылета снаряда из дула, не может выйти в поперечный канал и тем самым задержать дальнейшее движение чеки.

В канале орудия чека не должна выпадать от действия центробежной силы, что достигается подбором веса чеки и ударника.

После вылета снаряда из дула от действия центробежной силы чека выпадает, а ударник своим жалом, под действием силы сопротивления воздуха на его головку, садится на предохранительную пластинку *3*. При этом расстояние между капсюлем и жалом сокращается до минимума, а следовательно, повышается мгновенность действия.

При встрече с преградой реакция последней на головку ударника продвигает его по направлению к капсюлю. Жало пробивает предохранительную пластинку и накалывает капсюль.

Наличие предохранительной чеки, выпадающей под действием центробежной силы, угрожает поражением находящихся вблизи своих самолетов и людей при стрельбе в боевых соединениях. Кроме того, возможно выпадение чеки в канале ствола, что влечет порчу нарезов.

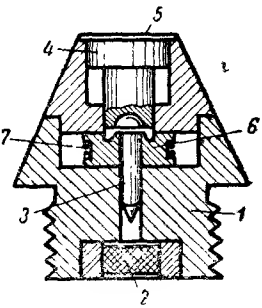


Рис. 49. Взрыватель мембранный.

Устройство взрывателя мембранного типа следующее (рис. 49). В дно корпуса *1* вставлен капсюль-детонатор *2*. В головке корпуса помещен ударник, состоящий из стального жала *3* и деревянного стержня с уширенной головкой *4*, повышающего чувствительность. Стержень прикрыт металлической мембраной *5*, предохраняющей его от действия силы сопротивления воздуха на полете.

Ударник и жало удерживаются от продвижения к капсюлю при обращении и выстреле предохранителем *6*, представляющим собой разрезной пустотелый цилиндр. Обе половины этого цилиндра по желобку охвачены кольцевой пружиной *7*. В верхнем торце предохранителя имеется кольцевой желобок, в который входит кольцевой выступ головки жала.

При выстреле, вследствие действия центробежной силы, части разрезного цилиндра *6* стремятся растянуть кольцевую пружину *7* и разойтись в стороны, но этому препятствует ударник с жалом, который, входя кольцевым выступом в кольцевой желобок торца предохранителя, удерживает предохранитель в начальном положении.

По вылете снаряда из канала ствола наступает момент, когда ударник с жалом приобретает отрицательное ускорение и придвигается вплотную к мембране, а кольцевой выступ головки жала выходит из кольцевого желобка предохранителя. Последний под действием центробежной силы растягивает пру-

жину 7 и расходится в стороны, освобождая тем самым путь продвижения ударника с жалом к капсюлю.

При встрече с преградой реакция последней действует на мембрану, а мембрана — на ударник. В результате этого ударник, продвигаясь к капсюлю, накалывает его жалом.

В качестве примера устройства донного взрывателя для бронебойных снарядов приведем инерционный взрыватель, изображенный на рис. 50.

В гнездо корпуса *1* вставлен металлический ударник *2*, закрепленный чекой *3*, сопротивление которой рассчитано так, что в обращении она вполне предохраняет ударник от накола на капсюль, а при ударе о броню срезается вследствие инерции ударника. В верхнюю часть гнезда корпуса ввинчен капсюль-детонатор *4*.

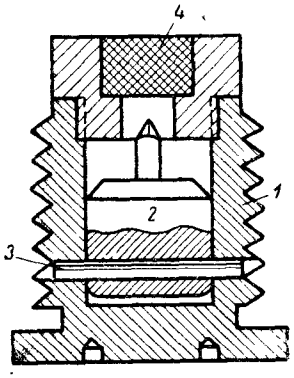


Рис. 50. Взрыватель донный.

При выстреле предохранительная чека *3* надрезается на величину зазора между дном гнезда корпуса и ударником. В момент удара снаряда о броню ударник благодаря инерции срезает чеку, и жало накалывает капсюль.

§ 19. УСТРОЙСТВО ГИЛЬЗ

Основное назначение металлической гильзы — соединение всех элементов патрона для облегчения заряжания, сохранения заряда от влияния внешних условий и устранения прорыва пороховых газов при выстреле (обтюрация).

Особое значение гильза (ее форма, относительные размеры, материал) приобретает в условиях работы автоматического оружия.

При комплектации патрона, если диаметр и длина пули не могут быть изменены ввиду уже принятого балистического решения, очевидно, наивыгоднейшая форма патрона определяется формой гильзы.

По форме гильзы можно подразделить на два вида: 1) цилиндрические и 2) бутылочные.

Цилиндрическая форма гильз крайне невыгодна в отношении экстрактирования, особенно в системах с большими давлениями и скорострельностью. Поэтому, как правило, цилиндрическая форма гильз применяется для патронов револьверов и пистолетов со слабой балистикой.

Бутылочная форма гильзы применяется для всех видов винтовок, пулеметов и автоматических малокалиберных пушек.

Гильза бутылочной формы состоит из четырех частей: дульца, ската, корпуса и донной части.

Характеристикой гильзы, определяющей соотношение между продольными и поперечными размерами, служит *коэфициент бутылочности* ψ или степень бутылочности $\varepsilon_1 = \psi^2$ (см. стр. 49).

Коэффициент бутылочности представляет собой отношение:

$$\psi = \sqrt{\frac{l_1}{l_a}} = \sqrt{\varepsilon_1}, \tag{91}$$

где l_1 — приведенная длина каморы;

l_a — истинная длина (от дна гильзы до дна пули в патроне).

С некоторой погрешностью величину ψ можно представить как отношение среднего внутреннего диаметра d_m к калибру d, т. е.

$$\psi = \frac{d_m}{d}. \tag{92}$$

Связь между этими двумя отношениями получается из следующих соображений. Если принять, что объем гильзы w_a равен произведению истинной ее длины l_a на среднюю внутреннюю площадь поперечного сечения S_m, то

$$w_a = l_1 S_0 = l_a S_m.$$

Так как

$$S_0 \approx \frac{\pi d^2}{4} \text{ и } S_m = \frac{\pi d_m^2}{4},$$

то

$$\frac{S_m}{S_0} \approx \frac{d_m^2}{d^2} \approx \frac{l_1}{l_a},$$

откуда, по определении ψ, имеем:

$$\psi = \sqrt{\frac{l_1}{l_a}} \approx \frac{d_m}{d}.$$

Как видно, $\psi \geqslant 1$. Для существующих патронов $\psi = 1{,}25 \div 1{,}5$. Гильза нашего патрона имеет $\psi = 1{,}4$. Для цилиндрических гильз $\psi = 1$.

Выбор значения ψ определяется конструкцией и весом автоматики, а также условиями экстрактирования гильзы. Увеличение длины патрона, т. е. уменьшение величины ψ, ведет к увеличению длины хода автоматики, снижению темпа стрельбы, ухудшению условий экстрактирования, увеличению габаритов магазинов и подающих устройств. При больших значениях ψ увеличиваются поперечные размеры затвора и ствольной коробки, ввиду чего растут веса и габариты. Нужно уметь найти наивыгоднейшее сочетание размеров патрона и оружия.

Кроме коэфициента бутылочности, работа оружия зависит от устройства и размеров других элементов гильзы: дульца, ската и донной части.

По положению современных гильз в патроннике их можно разделить на три типа:

1) с упором закраиной в обрез пенька ствола;

2) с упором скатом гильзы в скат патронника;

3) с упором выступом гильзы в уступ патронника.

Внешний вид указанных типов гильз и положение их в патроннике ясны из рис. 51.

Гильзы с закраиной имеют то преимущество, что они обеспечивают правильное положение патрона в патроннике благодаря закраине и позволяют применить допуски для гильз и патронника меньшей точности.

Однако этот тип гильз имеет существенные недостатки: 1) осложняется работа механизмов подачи и их конструкция, в особенности при магазинном питании; 2) увеличиваются поперечные размеры затвора и ствольной коробки.

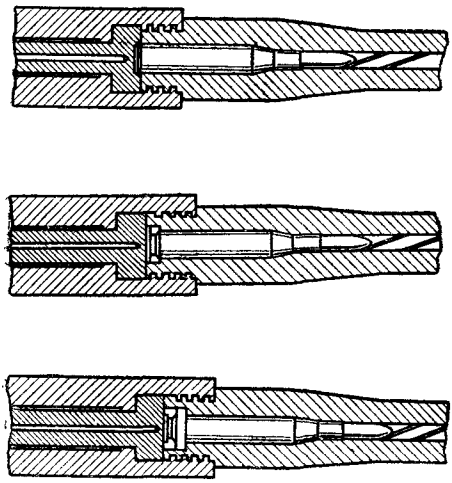


Рис. 51. Положение гильз в патроннике.

Первый тип гильз для образцов винтовочного калибра принят в СССР, Франции, Англии, Румынии, Голландии и др.

В большинстве стран — США, Германии, Испании, Италии, а также и в указанных выше странах, — в разработанных и разрабатываемых новых образцах и калибрах принимается второй тип гильзы.

При изготовлении гильз второго типа требуются большая точность и минимальные допуски. Неточность обработки ската может привести к углублению патрона в патронник, вследствие чего и выход ударника окажется недостаточным для того, чтобы разбить капсюль. Если гильза вошла в патронник с недокрытием, то ударник, пробивая капсюль, может вызвать прорыв пороховых газов; кроме того, затвор будет туго запираться.

Интересно отметить, что в японском 6,5-*мм* патроне Арисака, служащим представителем второго типа, допущено увеличение диаметра дна с таким расчетом, что гильза с упором скатом в то же время несколько упирается в обрез пенька ствола (работает как полузакраина). При неблагоприятной системе допусков эта полузакраина не работает, и такой способ теряет смысл.

Третий тип гильзы проверен опытом в небольшом числе систем: 20-*мм* пушка RM, охотничье ружье „Экспресс-Голланд", английское противотанковое 13,8-*мм* ружье. Гильза лишена всех недостатков, свойственных первым двум типам, но сама имеет весьма отрицательное свойство — большой вес, который равен 0,45—0,50% веса патрона („мертвый" вес); поэтому рас-

пространения для патронов автоматического оружия она не получила.

Размеры элементов гильзы подбираются из следующих соображений.

Длина и толщина дульца гильзы должны обеспечивать прочное закрепление пули.

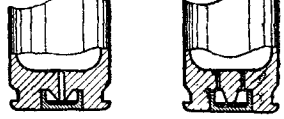
Патрон в автоматическом оружии, особенно в скорострельных системах, при подаче подвергается резким рывкам и имеет продольные и поперечные колебания, при которых пуля может изменить положение в дульце и вызвать задержку. Во избежание этого длину дульца делают с расчетом достаточной поверхности обхвата, пулю вставляют с некоторым натягом и, кроме того, накерновывают или обкатывают по окружности. Мерой прочности крепления пули в дульце служит усилие для вытягивания пули. Для обычных винтовочных и пулеметных патронов это усилие находится в пределах 16—60 *кг*. Для скорострельных систем оно повышается до 100—120 *кг*. Известно, что величина усилия для вытягивания пули оказывает заметное влияние на наибольшее давление в канале ствола и начальную скорость пули [1].

Длина дульца у современных гильз лежит в пределах 1—1,25 калибра, толщина стенок — 0,3—0,4 *мм*.

Подбор длины и конусности ската имеет особое значение для гильз второго типа. У них длина ската колеблется в пределах 3—4 *мм*. Значительное уменьшение ската гильзы приводит к деформациям ее при обжиме. Наружная конусность гильзы составляет 1—1°,5.

Продольное сечение гильзы, приблизительно от середины утолщающееся книзу, обеспечивает от поперечных и продольных разрывов.

Толщина дна гильзы подбирается из расчета устройства гнезда для капсюля, закраины или желобка для помещения зацепа выбрасывателя, а также из тех соображений, что экстрактирование может начинаться при некотором давлении в канале, которое может привести к отрыву дна гильзы.



а *б*

Рис. 52. Типы затравочных отверстий.

В гнезде для капсюля имеются наковальня, о которую разбивается ударный состав капсюля, и затравочные отверстия для передачи луча огня боевому заряду.

Встречаются патроны с одним затравочным отверстием (рис. 52, *а*), которое проходит через наковальню, или, в большинстве случаев, с двумя затравочными отверстиями (рис. 52, *б*).

Материалом для гильз служит латунь или плакированное железо.

---

[1] Проф. Д. А. Вентцель, Внутренняя балистика, ч. 1-я, изд. ВВА, 1939, стр. 203.

Латунь благодаря своей тягучести является наилучшим гильзовым материалом в производственном отношении, так как гильза изготовляется путем ряда последовательных протяжек; латунная гильза обеспечивает и лучшее экстрактирование.

Экономические соображения (громадный расход гильз) заставляют переходить к железным гильзам.

Для наших патронов применяется гильзовая латунь следующего состава: меди — 66,5—70% и цинка — 33,5—30%.

Никель за счет цинка может быть введен до 0,3%. Общее количество случайных примесей не должно превышать 0,2% (железо — 0,1%, свинец — 0,05%, фосфор — 0,005%, мышьяк — 0,005%, сера и сурьма — следы). Висмут не допускается совсем.

По механическим свойствам латунь должна иметь: временное сопротивление разрыву $R = 30 - 35$ *кг/мм*^{2} и остаточное удлинение при разрыве $i = 50 - 75\%$.

§ 20. КАПСЮЛИ

В зависимости от характера воспламенения заряда, патроны можно подразделить на два вида:

1) патроны кругового воспламенения (бокового огня);

2) патроны центрального воспламенения.

В цельнотянутых патронах кругового воспламенения ударный состав размещен непосредственно в гильзе и запрессован по окружности закраины (рис. 53). Ударник в затворах делается эксцентричным. Преимущество такого способа воспламенения состоит в том, что при осечках, повернув патрон, можно добиться выстрела.

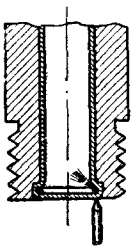


Рис. 53. Патрон кругового огня.

Однако эти патроны имеют очень существенные недостатки:

1. При воспламенении ударного состава самому сильному давлению газов подвергается та часть гильзы, где металл ослаблен двойным перегибом; поэтому гильза часто разрывается.

2. Более опасны в обращении вследствие большой поверхности с ударным составом.

3. Не выдерживают длительного хранения.

Поэтому такие патроны хотя и применялись в прошлом, сейчас сохранились лишь для малокалиберных образцов — 5,6 *мм* (0,22″).

Современные патроны боевого огнестрельного оружия — центрального воспламенения и снабжаются капсюлями-воспламенителями.

Капсюль-воспламенитель должен надежно воспламенять порох, прочно держаться в гнезде гильзы, не пробиваться насквозь бойком, не вылетать из гнезда от давления газов при выстреле.

Капсюль для наших патронов (рис. 54) представляет собой колпачок из красной меди или латуни, на дне которого запрессован ударный состав. Поверхность колпачка лакируется во

избежание химического взаимодействия, а также для более прочного удержания в колпачке ударного состава. Сверху состав закрыт напрессованным фольговым кружком, который служит главным образом для предохранения состава от сырости и, кроме того, удерживает его от выпадения.

В качестве основного инициирующего вещества в капсюле применяется гремучая ртуть $Hg(CNO)_2$. Однако чистая гремучая ртуть непригодна для снаряжения капсюлей. Взрывчатое разложение гремучей ртути протекает очень быстро, но с малым содержанием газообразных продуктов и низкой температурой. Луч огня ее недостаточно интенсивен. Для увеличения интенсивности луча огня ударный состав приготовляют в настоящее время из гремучей ртути, антимония (трехсернистая сурьма Sb_2S_3) и бертолетовой соли $KClO_3$.

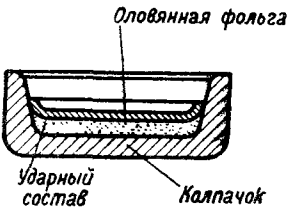


Рис. 54. Капсюль.

При ударе гремучая ртуть вспыхивает и разлагает бертолетовую соль, богатую кислородом. Загоревшийся при вспышке гремучей ртути антимоний сгорает благодаря притоку кислорода от бертолетовой соли. Зернистое строение антимония способствует более продолжительному горению всего состава и получению небольшого луча с невысокой температурой, но достаточной для воспламенения пороха.

Таким образом, компоненты ударной смеси выполняют следующие задачи: *гремучая ртуть служит инициатором вспышки, антимоний есть горючее, которое повышает температуру и образует пламя, а бертолетовая соль поддерживает горение.*

В капсюльные составы вводят и другие вещества: для повышения чувствительности — измельченное стекло, для понижения чувствительности — вяжущие средства (шеллак, желатин, гуммиарабик и др.).

Содержание составных частей и веса некоторых наших капсюлей приведены в таблице 5 [1].

Таблица 5

Вид капсюлей	Состав в %			Вес состава в *г*
	гремучая ртуть	антимоний	бертолетовая соль	
Винтовочные	16,7	27,8	55,5	0,028—0,030
Охотничьи центрального боя . .	16,7	27,8	55,5	0,028—0,030
Охотничьи шомпольные	16,7	27,8	55,5	0,018—0,020
Револьверные и пистолетные .	25,8	37,1	37,1	0,013—0,020
Трубочные	23,0	36,0	36,0	0,120—0,160
	50,0	25,0	25,0	
Орудийные	25,0	30,0	45,0	0,070—0,080

[1] См. П. П. Карпов, Капсюльное дело, ОНТИ, 1934.

Следует отметить, что капсюльные составы с гремучей ртутью и бертолетовой солью, продукты разложения которых имеют кислотный характер, очень вредно действуют на канал ствола, вызывая его коррозию. Поэтому многие специалисты работают по подбору ударных составов, не вызывающих коррозии.

В гнездо гильзы капсюль обычно вставляют с некоторым натягом (у нас — до 0,1 *мм*). Степень крепления капсюля проверяют путем весьма жестких технических испытаний.

Капсюль действует следующим образом. При ударе бойка ударника ударный состав, прижатый к наковальне, продвигается вперед, и от удара о наковальню происходит выстрел. Следует отметить, что хотя состав и чувствителен к удару, но надежный взрыв получается только тогда, когда поверхность состава плотно прижата к наковальне патрона. Если наковальня расположена очень низко или капсюль посажен так, что ударный состав не касается наковальни, происходит осечка. При повторении удара по капсюлю, давшему осечку, выстрел может произойти благодаря тому, что капсюль от предыдущего удара глубже вошел в гнездо, и ударный состав прижался к наковальне.

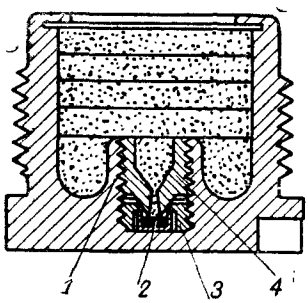


Рис. 55. Капсюльная втулка.

Патрон, давший осечку, никогда нельзя считать безопасным.

При переходе к калибрам больше 37 *мм*, когда пороховой заряд по поверхности горения и весу значительно увеличивается, обычный капсюль не в состоянии обеспечить нормальное воспламенение. Делать капсюль больших размеров с увеличенным количеством ударного состава по условиям безопасности нельзя. Поэтому для орудийных калибров выше 37 *мм* применяют особое устройство — капсюльную втулку, в которой к нормальному капсюлю-воспламенителю придается добавочный воспламенитель в виде небольшого заряда черного пороха. Устройство такой капсюльной втулки иллюстрирует рис. 55.

Внутри латунного корпуса втулки со сплошным плоским дном имеется сосок *1*, в который помещен капсюль *2*. Капсюль прижат втулочкой *3* и наковальней *4*, ввинченной в сосок и имеющей по оси сквозной канал. Внутри трубки помещен заряд черного пороха весом около 7 *г*, нижняя часть которого зернистая (весом 0,6 *г*), а верхняя состоит из спрессованных лепешек. Сверху пороховой заряд закрыт марлевым кружком, а затем — латунным с отверстием; наружная поверхность латунного кружка густо покрыта лаком.

В таком собранном виде втулка и ввинчивается в гильзу орудийного патрона. При ударе бойка о дно втулки металл втулки вдавливается, и капсюль наталкивается на наковальню;

огонь от воспламенения капсюля через сквозной канал наковальни воспламеняет пороховой заряд, а последний передает огонь боевому заряду гильзы.

§ 21. О РАСЧЕТЕ СНАРЯДОВ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛЕТА ПУЛЬ И СНАРЯДОВ

Изложенные выше сведения относились главным образом к основаниям устройства и действию боеприпасов. Между тем это только одна сторона вопроса изучения боеприпасов. Необходимо еще уметь рассчитывать боеприпасы. Однако в пределах данного труда это изложить не представляется возможным. Расчет боеприпасов является предметом специального изучения[1] и охватывает обычно следующие главные вопросы:

1) расчет прочности снаряда и его элементов при выстреле;
2) обеспечение устойчивости на полете;
3) обеспечение прочности и действия снаряда при ударе о преграду.

Однако обеспечение устойчивости снаряда (пули) на полете находится в тесной связи с конструированием оружия, а именно — с такими его элементами, как выбор наивыгоднейшего балистического решения, выбор крутизны нарезов ствола, действие автоматики и питание оружия. Поэтому ниже рассматривается вопрос обеспечения устойчивости полета пуль и снарядов.

Устойчивый полет пули или снаряда, а в связи с этим и хорошая меткость, как показывает опыт, обеспечиваются определенной крутизной нарезки оружия, зависящей от соотношения динамических характеристик пули или снаряда.

Под динамическими характеристиками пуль и снарядов подразумевается: вес, положение центра массы и распределение масс относительно осей, выражаемое моментами инерции — полярным и экваториальным. Момент инерции относительно продольной оси снаряда называется *полярным*, а момент инерции относительно любой оси, проходящей через центр массы в плоскости поперечного сечения, называется *экваториальным*.

Известен ряд формул для определения крутизны нарезов в зависимости от динамических характеристик снаряда (Забудского, де-Спарра и др.), которые подробно исследуются во внешней балистике при изучении вращательного движения снаряда.

У нас для этой цели принято пользоваться формулой, предложенной известным русским артиллеристом Н. А. Забудским (1890 г.) и несколько видоизмененной с учетом современных конструкций снарядов.

---

[1] См. М. Г. Ефимов, Курс артиллерийских снарядов, Оборонгиз, 1939.

Формула Забудского, эмпирическим путем приведенная в соответствие с современными конструкциями снарядов, имеет вид:

$$N = a\,\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{A}{B}\cdot\frac{\mu c_q}{z k_m(v)}}, \tag{93}$$

или, вынося $\frac{\pi}{2}$ под знак радикала:

$$N = a\sqrt{\frac{A}{B}\cdot\frac{\mu c_q}{z\left[\frac{4}{\pi^2}k_m(v)\right]}}, \tag{94}$$

где N — длина хода нарезов в калибрах;

a — коэфициент (меньше единицы), обеспечивающий некоторый запас устойчивости;

$\frac{A}{B}$ — отношение полярного момента инерции к экваториальному;

μ — численный коэфициент, равный:

$$\mu = \frac{Ag}{q\left(\frac{d}{2}\right)^2} = \left(\frac{\rho}{r}\right)^2;$$

здесь q — вес снаряда, d — калибр;

$c_q = \frac{q}{d^3}$ — коэфициент веса;

$k_m(v)$ — известная из внешней балистики функция скорости, которая, на основании опытов, для современных снарядов и пуль, включая множитель $\frac{4}{\pi^2}$, может быть задана таблицей 6.

Таблица 6

v м/сек	$k_m(v)$	$\frac{4}{\pi^2}k_m(v)$	v м/сек	$k_m(v)$	$\frac{4}{\pi^2}k_m(v)$	v м/сек	$k_m(v)$	$\frac{4}{\pi^2}k_m(v)$
0—200	0,00097	0,000393	400	0,00138	0,000562	750	0,00133	0,000538
250	0,00100	0,000406	450	0,00139	0,000564	800	0,00132	0,000535
275	0,00105	0,000426	500	0,00138	0,000561	850	0,00131	0,000533
300	0,00113	0,000460	550	0,00137	0,000555	900	0,00131	0,000531
325	0,00124	0,000501	600	0,00135	0,000549	950	0,00131	0,000530
350	0,00132	0,000534	650	0,00134	0,000544	1 000	0,00130	0,000529
375	0,00136	0,000553	700	0,00133	0,000541	1 050	0,00130	0,000528
400	0,00138	0,000562	750	0,00133	0,000538	1 100	0,00130	0,000527

Величина z представляет собой расстояние между центром массы снаряда и центром сопротивления. Это расстояние, выражаемое в калибрах, включает два элемента:

$$z = z_0 + z_1,$$

где z_0 — расстояние от центра сопротивления до основания головной части;

z_1 — расстояние от центра массы снаряда до того же основания головной части.

Величина z_1 может быть вычислена непосредственно по чертежу. Величина же z_0 для современных довольно однотипных снарядов и пуль выражается следующей зависимостью, полученной из опыта:

$$z_0 = 0{,}57h - 0{,}16, \tag{95}$$

где h — высота головной части в калибрах.

Из существа формулы для крутизны нарезов вытекает, что пользоваться ею можно в тех случаях, когда:

1) к существующему оружию проектируется новый снаряд, динамические характеристики которого должны удовлетворять имеющейся крутизне нарезки;

2) под существующие боеприпасы проектируется оружие;

3) заново проектируются боеприпасы и оружие, даже и новых калибров.

Значение коэфициента a, которым, собственно, и можно исправить до некоторой степени неточности в связи с принятием опытной зависимости z_0 и функции $k_m(v)$ для пуль и малокалиберных снарядов, можно определить следующим образом. Вычисляют длину хода нарезов для некоторых определенных пуль и малокалиберных снарядов, полагая при этом $a = 1$, и сравнивают полученную величину с длиной хода нарезов, действительно имеющейся у данного оружия:

$$a = \frac{N}{N_{a=1}}.$$

Например, расчеты для нашей пули и французской D дают величины, приведенные в таблице 7.

Таблица 7

Тип пули или снаряда	v_0	$\frac{A}{B}$	μ	c_q	z	$k_m(v)$	$N_{a=1}$	N	$a = \frac{N}{N_{a=1}}$
7,62-*мм* легкая пуля	840	0,1100	0,451	21,7	1,14	0,00131	42,2	32	0,758
8-*мм* французская пуля . .	700	0,0957	0,466	25,0	1,41	0,00133	38,3	30	0,783

Для надежной устойчивости при расчетах обычно принимают $a = 0{,}75$; тогда окончательно расчетная формула напишется так:

$$N = 0{,}75 \sqrt{\frac{A}{B} \cdot \frac{\mu c_q}{z\left[\frac{4}{\pi^2} k_m(v)\right]}}. \tag{96}$$

При вычислении указанных выше величин следует соблюдать соответствие единиц: веса в граммах, длины в сантиметрах (а затем в калибрах), плотности δ в граммах на кубический сантиметр ($г/см^3$), ускорение силы тяжести принимать равным $g = 981$ $см/сек^2$; моменты инерции в принятой системе единиц будут выражаться в $гсм\,сек^2$.

Для вычисления динамических характеристик целесообразно определить сначала элементы: вес q, координату центра тяжести ξ_c, полярный A и экваториальный B моменты инерции отдельных фигурных частей снаряда (оживальной части, конуса, донной части и взрывателя). Затем следует составить сводную таблицу 9 (см. стр. 119), в которую войдут элементы для остальных, преимущественно цилиндрических частей.

Квадратуры для фигурных частей, к которым в данном случае сводится весь расчет, можно вычислять различными способами. В приложении 4 изложены только два таких способа: применение формулы квадратур Эйлера и метод проф. Бравина.

§ 22. РАСЧЕТЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬ И СНАРЯДОВ

Для расчета динамических характеристик снаряда необходимо прежде всего разбить его на отдельные части простейшей формы: цилиндр, усеченный конус, оживальная часть и т. д. (рис. 56); затем определить характеристики этих отдельных частей:

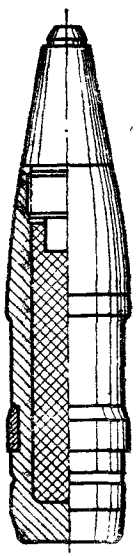


Рис. 56. Схема снаряда.

1) вес $\Delta q = \delta \Delta w$, где Δw — объем;

2) координату центра тяжести ξ_c;

3) полярный момент инерции $\Delta A = \frac{\delta}{g} \Delta I_0$, где ΔI_0 — полярный момент инерции объема;

4) экваториальный момент инерции $\Delta B' = \frac{\delta}{g} \Delta I$, где ΔI — экваториальный момент инерции объема.

Наконец, найти по известным формулам теоретической механики общие характеристики всего снаряда.

Во избежание лишних расчетов следует заметить, что экваториальный момент инерции $\Delta B'$ равен собственному плоскостному моменту инерции ΔB_1, вычисленному относительно плоскости, перпендикулярной к оси вращения снаряда и проходящей через центр тяжести данной фигуры, и сложенному с $\frac{1}{2} \Delta A$, что, в свою очередь, равно плоскостному моменту инерции данной фигуры относительно диаметральной плоскости снаряда:

$$\Delta B' = \Delta B_1 + \frac{1}{2}\Delta A = \frac{\delta}{g}\Delta I_1 + \frac{1}{2}\Delta A.$$

Величина ΔA нам уже известна; следовательно, расчету подлежит только величина

$$\Delta B_1 = \Delta B' - \frac{1}{2}\Delta A = \frac{\delta}{g}\Delta I_1.$$

Тогда общий вес снаряда q, его центр тяжести l_c и моменты инерции A и B получим на основании следующих формул:

$$q = \Sigma \Delta q; \qquad x_0 = \frac{1}{q}\Sigma(x + \xi_c)\Delta q;$$

$$l_c = l_0 + x_0; \quad A = \Sigma \Delta A;$$

$$B_1 = \Sigma\left[\Delta B_1 + (x + \xi_c)^2 \frac{\Delta q}{g}\right] - \frac{q}{g}x_0^2;$$

$$B = B_1 + \frac{1}{2}A,$$

где x — координата основания данной фигуры от произвольно выбранного начала, расположенного на расстоянии l_0 от дна снаряда;

ξ_c — координата центра тяжести данной фигуры от ее основания, обращенного к началу.

Отсюда видно, что математическая сторона вопроса сводится к определению элементов Δw, ξ_c, ΔI_0 и ΔI_1 методом квадратур с последующим введением в расчет удельного веса δ и пересчетом элементов в общие характеристики.

Обозначив через r_i вообще переменный внешний радиус фигуры, через r и R — радиусы соответственно малого и большого оснований фигуры, представим наши квадратуры в таком виде:

$$\Delta w = \pi \int_0^h r_i^2 \, d\xi = \alpha \cdot \pi R^2 h, \tag{97}$$

где α — коэфициент продольной полноты объема;

h — высота фигуры;

$$\xi_c = \frac{1}{\Delta w}\pi \int_0^h \xi \, r_i^2 \, d\xi = \beta\frac{h}{2}; \tag{98}$$

здесь β — коэфициент координаты центра тяжести.

$$\Delta I_0 = \frac{\pi}{2}\int_0^h r_i^4 \, d\xi = \rho_0^2 \Delta w, \tag{99}$$

где $\rho_0^2 = \mu_0 R^2$ — квадрат радиуса полярного момента инерции;

$$\Delta I_1 = \pi \int_0^h \xi^2 r_i^2 \, d\xi - \xi_c^2 \Delta w = \rho_1^2 \Delta w; \qquad (100)$$

здесь $\rho_1^2 = \nu_0 \left(\frac{h}{2}\right)^2$ — квадрат радиуса собственного плоскостного момента инерции.

Отвлеченные коэфициенты α, β, μ_0 и ν_0 пишем в простейшей их форме. Они отличаются от принятых коэфициентов формы фигуры в снарядном деле тем, что коэфициент α отнесен к объему цилиндра $\pi R^2 h$ с круговым основанием πR^2, а не призмы $R^2 h$ с квадратным основанием R^2; коэфициент β отнесен не к h, а к $\frac{h}{2}$, а ν_0 — не к h^2, а к $\left(\frac{h}{2}\right)^2$, что методически более правильно.

Написанные выше интегралы берем как для сплошных однородных тел вращения с удельным весом δ, включаемым в дальнейшие расчеты.

Внутренние объемы, заполненные другим веществом (например, толом с удельным весом δ_1, медью для корпуса взрывателя с удельным весом δ_2 и т. д.), будем рассчитывать как объемы, заполненные материалом разностного удельного веса, например: $\delta_1 - \delta$; $\delta_2 - \delta$ и т. д., что равносильно освобождению их от материала δ путем штамповки, расточки или сверловки (знак минус у δ) и заполнению их материалом δ_1, δ_2 и т. д. (знак плюс у δ_1, δ_2 и т. д.).

Такой способ расчета вполне естественен, и он не свяжет нас в выборе высот h отдельных частей (как внешних, так и внутренних), на которые будет разделен весь снаряд.

Значения коэфициентов α, β, μ_0 и ν_0 для простейших фигур известны из курсов теоретической механики и приводятся в таблице 8.

Таблица 8

Цилиндр	Усеченный конус	Конус
$\alpha = 1$	$\alpha = \frac{1 + \rho + \rho^2}{3}$	$\alpha = \frac{1}{3}$
$\beta = 1$	$\beta = \frac{1 + 2\rho + 3\rho^2}{6\alpha}$	$\beta = \frac{1}{2}$
$\mu_0 = \frac{1}{2}$	$\mu_0 = \frac{1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \rho^4}{10\alpha}$	$\mu_0 = 0{,}300$
$\nu_0 = \frac{1}{3}$	$\nu_0 = \frac{(1+\rho)^4 + 4\rho^2}{60\alpha^2}$	$\nu_0 = 0{,}150$

В таблице 8 отношение радиусов оснований обозначено через

$$\rho = \frac{r}{R}.$$

Если бы снаряд состоял только из цилиндрических частей, то все вычисления можно было бы производить непосредственно в сводной таблице, благодаря исключительной простоте расчетных формул для цилиндра:

$$\Delta w = \pi R^2 h; \quad \xi_c = \frac{1}{2} h;$$

$$\rho_0^2 = \frac{1}{2} R^2; \quad \rho_1^2 = \frac{1}{3}\left(\frac{h}{2}\right)^2.$$

Части относительно малой величины, имеющие форму усеченного конуса, равно как всякого рода заточки, скругления и т. п., а также малые объемы, при ограниченном их числе, можно рассчитывать как цилиндры со средним радиусом.

Большие объемы, представляющие форму усеченного конуса, необходимо рассчитывать отдельно по точным коэфициентам, указанным в таблице 8, что не представляет никаких затруднений.

Оживальную часть снаряда, очерчиваемую в сечении по дуге круга или по параболе, можно в некоторых случаях рассчитывать по аналитическим формулам. Но, как правило, эти формулы имеют довольно сложный вид. Поэтому здесь проще пользоваться приближенными формулами.

Оживальная часть очерчивается в сечении весьма плавной дугой; поэтому характеристики следует определять для всей оживальной части сразу, применяя достаточно сильные формулы квадратур (см. приложение 4).

Вычислив отдельно элементы Δw, ξ_c, ρ_0^2 и ρ_1^2 больших частей, отличных от цилиндра (оживальная часть, усеченные конусы), сразу переходим к составлению сводной таблицы (см. таблицу 9) и вписываем в нее: высоты h (по оси снаряда) всех частей корпуса и снаряжения, указывая их наименования в первой заглавной графе; в следующей графе помещаем их внешние радиусы r_e (индекс e от слова extérieur). Для кольцевых частей, как, например, поясок, паз, выточка, центрующее утолщение, записываем внутренние радиусы r_i (от слова intérieur) и средние радиусы $r_{\text{med}} = \frac{1}{2}(r_e + r_i)$.

В графу величин Δw заносим объемы цилиндров $\Delta w = \pi r_e^2 h$, вычисляемые тут же непосредственно на линейке, объемы прочих фигурных частей, а также значения ξ_c, ρ_0^2 и ρ_1^2 берем из предварительных расчетов (в сводной таблице они помечены звездочкой).

В графе 7 отмечаем удельный вес стальных частей $\delta = 7{,}85$ и медных $\delta = 8{,}90$; заряд засчитываем разностным удельным весом: $\delta = -7{,}85$ (удаление стали) $+1{,}56$ (заполнение толом) $= -6{,}29$; для нарезки взрывателя берем $\delta = -7{,}85 + 6{,}02$ (сплав) $= -1{,}83$.

Хвост взрывателя замещает тол; поэтому сюда вписываем удельный вес $\delta = -1{,}56 + 6{,}02$ (сплав) $= 4{,}46$ и т. д.

В графе 8 помещаем весовые данные.

Общий центр тяжести снаряда надо вычислять относительно координатной плоскости, близкой к середине, так как тогда результат получится точнее, чем если назначить положение ее у дна или вершины снаряда. Погрешность сказалась бы особенно при вычислении собственного плоскостного момента инерции, так как в последнем случае его пришлось бы рассчитывать по разности больших чисел, а этот прием является порочным.

Координата x определяет положение основания данной части, обращенного к началу; ξ_c — положение центра тяжести данной части относительно этого основания; следовательно, $x_c = x + \xi_c$; ΔM есть весовой момент (положительный или отрицательный) относительно координатной плоскости.

В следующей графе вычисляем переносные плоскостные моменты инерции веса отдельных частей по формуле:

$$\Delta B_2' = \Delta q \cdot x_c^2 = (\Delta q \cdot x_c)\ x_c = \Delta M \cdot x_c,$$

что делается перемножением величин в двух смежных графах, стоящих слева.

В графе ρ_1^2 заключены для фигурных частей ранее полученные величины, а для цилиндров — величины $\rho_1^2 = \frac{1}{3}\left(\frac{h}{2}\right)^2$.

Графа 16 содержит значения ρ_0^2, ранее полученные для фигурных частей, и значения для цилиндров, рассчитываемые по формуле

$$\rho_0^2 = \frac{1}{2} r_e^2.$$

В графах 15 и 17 записываем значения собственных плоскостных и полярных моментов инерции веса рассчитываемых частей снаряда.

По заполнении всей таблицы, разбитой на две части для объемов по одну и по другую сторону координатной плоскости, вычисляем итоги Δq, ΔM, $\Delta B_2'$, $\Delta B_1'$ и $\Delta A'$ и обрабатываем их, переходя в выражениях для моментов инерции от веса к массе делением на ускорение силы тяжести $g = 981$ *см/сек*^{2} при размерности длин в сантиметрах.

Примечание. Сразу переходить к массе, рассчитывая ΔB_2, ΔB_1 и ΔA, не следует, потому что тогда появится столько лишних операций деления, сколько частей значится в графе 1.

Сводная таблица для расчета характеристик снаряда

Наименование	h	r_e	r_i	r_{med}	Δw	δ	Δq	x	$\xi_c=\beta\frac{h}{2}$	x_c	ΔM	$\Delta B_2'$	$\rho_1^2=\nu_0\left(\frac{h}{2}\right)^2$	$\Delta B_1'$	$\rho_0^2=\mu_0 r_e^2$	$\Delta A'$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Для донной части																
Задний конус . .	0,65	1,13	—	—	2,39	7,85	18,7	3,32	0,32	3,64	68,0	248,0	0,035	0,65	0,588	11,00
Цилиндр	3,32	1,13	—	—	13,35	7,85	104,5	0	1,66	1,66	174,0	289,0	0,918	96,00	0,638	66,70
Поясок	0,83	1,20	1,00	1,10	1,14	8,90	10,1	1,31	0,42	1,73	17,4	30,1	0,057	0,57	1,210	12,20
							133,3				259,4	567,1		97,22		89,90
Заряд	3,17	0,69	—	—	4,73	—6,29	—29,7	0	1,59	1,59	—47,2	—75,0	0,837	—24,85	0,238	—7,07
Паз	0,90	1,13	1,00	1,06	0,78	—7,85	— 6,1	1,24	0,45	1,69	—10,3	—17,4	0,067	— 0,41	1,120	—6,82
Выточка	0,20	1,13	1,07	1,10	0,08	—7,85	— 0,6	2,56	0,10	2,66	— 1,6	— 4,3	0,003	— 0,00	1,210	—7,73
							—36,4				—59,1	—96,7		—25,26		—14,62
					Итого . . .		96,9		Итого . . .		200,3	470,4		71,96		75,28
Для головной части																
Заряд	2,60	0,69	—	—	3,90	—6,29	—24,5	0	1,30	1,30	—31,9	—41,5	0,562	—13,80	0,238	—5,82
Нарезка взрывателя	1,00	0,72	—	—	1,63	—1,83	— 3,0	2,6	0,50	3,10	— 9,3	—28,9	0,083	— 0,25	0,259	—0.78
							—27,5				—41,2	—70,4		—14,05		—6,60
Оживальная часть	2,60	—	—	—	9,24*	7,85	72,5	1,00	1,20*	2,20	160,0	352,0	0,542*	39,30	0,572*	41,50
Центрующее утолщение	0,47	1,15	1,13	1,14	0,07	7,85	0,6	0,55	0,24	0,79	0,5	0,4	0,018	0,01	1,300	0,78
Хвост взрывателя	0,74	0,40	—	—	0,37	4,46	1,7	1,86	0,37	2,23	3,8	8,4	0,046	0,08	0,080	0,14
Цилиндр	1,00	1,13	—	—	4,00	7,85	31,4	0	0,50	0,50	15,7	7,8	0,083	2,60	0,638	20,00
Конус	2,40	—	—	—	3,65*	6,02	22,0	3,60	0,95*	4,55	100,0	455,0	0,432*	9,50	0,272*	6,00
Цилиндр	0,12	0,38	—	—	0,05	6,02	0,3	6,00	0,06	6,06	1,8	10,9	0,000	0,00	0,072	0,02
Конус вершины .	0,25	0,38	0,24	0,31	0,08	6,02	0,5	6,12	0,13	6,25	3,1	19,4	0,000	0,00	0,050	0,03
							129,0				284,9	853,9		51,49		68,47
					Итого . . .		101,5		Итого . . .		243,7	783,5		37,44		61,87

Результаты:

Вес снаряда	Момент, опрокидывающий головную часть
96,9	— 200,3
101,5	+ 243,7
$q = 198{,}4 \approx 198$ г	$\Sigma\Delta M =$ 43,4

Моменты инерции

470,4	71,96	75,28
783,5	37,44	61,87
$\Sigma\Delta B_2' = 1253{,}9$	$\Sigma\Delta B_1' = 109{,}40$	$\Sigma\Delta A = 137{,}15$

Координата центра тяжести

$$x_0 = \frac{\Sigma\Delta M}{q} = \frac{43{,}4}{198} = 0{,}22 \text{ см}.$$

Расстояние от дна снаряда до центра тяжести

$$l_c = 3{,}97 + x_0 \approx 4{,}2 \text{ см}.$$

Полярный момент инерции снаряда

$$A = \frac{1}{g}\,\Sigma\Delta A' = \frac{137{,}15}{981} \approx 0{,}140.$$

Собственный плоскостной момент инерции снаряда

$$B_1 = \frac{1}{g}\left[\,\Sigma\Delta B_1' + \Sigma\Delta B_2'\,\right] - \frac{q}{g}\,x_0^2 =$$

$$= \frac{1363{,}3}{981} - \frac{198}{981}\,0{,}22^2 = 1{,}390 - 0{,}010 = 1{,}380.$$

Экваториальный момент инерции снаряда

$$B = B_1 + 0{,}5A = 1{,}450.$$

Отношение, необходимое при расчете крутизны нарезов ствола:

$$\frac{A}{B} = \frac{0{,}140}{1{,}450} = 0{,}0965.$$

Квадрат радиуса полярного момента инерции снаряда

$$\rho^2 = \frac{Ag}{q} = \frac{\Sigma\Delta A'}{q} = \frac{137{,}15}{198} \approx 0{,}69.$$

Отсюда коэфициент, характеризующий распределение масс,

$$\mu = \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 = \frac{0{,}69}{1{,}15^2} = 0{,}52.$$

Глава IV

РАСЧЕТЫ ПРОЧНОСТИ СТВОЛОВ

§ 23. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СТВОЛОВ НА ПРОЧНОСТЬ

При расчете снарядов и стволов приходится пользоваться формулами, относящимися к работе толстостенных цилиндров или труб, подверженных действию внутреннего давления. Выведем формулы для напряжений и перемещений толстостенной трубы, подверженной (для общности рассуждений) внутреннему и наружному давлению.

Обозначим:

r — внутренний радиус трубы;
R — наружный радиус трубы;
ρ — переменный радиус трубы;
$p_{вн}$ — внутреннее давление в трубе;
$p_{н}$ — наружное давление в трубе;
σ_r — радиальное напряжение в трубе;
σ — окружное напряжение в трубе;
u — деформация в направлении радиуса.

Если радиусу ρ соответствует удлинение u, то относительное удлинение может быть выражено формулой

$$\varepsilon_\rho = \frac{du}{d\rho}, \tag{101}$$

а по известному радиальному получим и окружное удлинение

$$\varepsilon_\sigma = \frac{2\pi(\rho + u) - 2\pi\rho}{2\pi\rho} = \frac{u}{\rho}. \tag{102}$$

Из курса сопротивления материалов известны выражения для относительных удлинений ε_ρ и ε_σ через напряжения σ_r и σ, а также и обратные зависимости:

$$\varepsilon_\rho = \frac{\sigma_r}{E} - \mu\frac{\sigma}{E}; \tag{103}$$

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\sigma}{E} - \mu\frac{\sigma_r}{E}; \tag{104}$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_\rho + \mu\varepsilon_\tau); \qquad (105)$$

$$\sigma = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_\tau + \mu\varepsilon_\rho), \qquad (106)$$

где μ — коэфициент Пуассона.

Для вывода необходимых нам зависимостей воспользуемся гипотезой Бернулли или гипотезой плоских сечений, предполагающей, что и деформированные сечения остаются плоскими. Гипотеза эта подтверждается опытом, показывающим в частности, что и после выстрела концевые сечения ствола остаются плоскими.

В каждой точке поперечного сечения трубы действуют два напряжения: σ и σ_r; напряжения эти, понятно, переменные. Так, например, напряжение σ_r изменяется от $p_{вн}$ на внутреннем радиусе трубы до $p_н$ на наружном радиусе. Указанные напряжения будут вызывать в каждой точке поперечного сечения трубы деформации не только в плоскости поперечного сечения, но и в плоскости, ему перпендикулярной. Чтобы сечение после деформации оставалось плоским, все перпендикулярные деформации должны быть одинаковыми, т. е. должно соблюдаться условие:

$$\varepsilon_1 = \text{const}.$$

Как известно из сопротивления материалов,

$$\varepsilon_1 = \mu\frac{\sigma_r}{E} + \mu\frac{\sigma}{E}; \qquad (107)$$

следовательно, приходим к условию:

$$\mu\frac{\sigma_r}{E} + \mu\frac{\sigma}{E} = \text{const},$$

или

$$\sigma_r + \sigma = \text{const}.$$

Рассмотрим теперь суммарную деформацию в какой-либо точке в плоскости трубы:

$$\varepsilon_{сум} = \varepsilon_\rho + \varepsilon_\tau. \qquad (108)$$

На основании формул (103) и (104) имеем:

$$\varepsilon_{сум} = \varepsilon_\rho + \varepsilon_\tau = \frac{\sigma_r}{E} - \mu\frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{E} - \mu\frac{\sigma_r}{E} = \frac{1-\mu}{E}(\sigma_r + \sigma)$$

и на основании формулы (108)

$$\varepsilon_{сум} = \varepsilon_\rho + \varepsilon_\tau = \text{const}. \qquad (109)$$

Подставив сюда значения ε_ρ и ε_τ из формул (101) и (102), получим:

$$\frac{du}{d\rho}+\frac{u}{\rho}=C=\text{const}, \tag{110}$$

т. е. дифференциальное уравнение, дающее зависимость между радиальным перемещением трубы и радиусом.

Для решения дифференциального уравнения (110) приведем его к виду:

$$\rho\, du+u\, d\rho=\rho\, d\rho\cdot C,$$

или на основании правила о дифференцировании произведения:

$$d(u\rho)=\rho\, d\rho\cdot C.$$

Интегрируя обе части, получим:

$$u\rho=\frac{\rho^2}{2}C+B,$$

где B — произвольная постоянная.

Обозначая постоянное $\frac{C}{2}=A$, приведем интеграл, разделив обе части его на ρ, к виду:

$$u=A\rho+\frac{B}{\rho}. \tag{111}$$

Уравнение (111) дает зависимость между радиальным перемещением трубы и радиусом в конечном виде.

Целью нашего исследования является получение формул для напряжений и перемещений в зависимости от внешних усилий (давлений) и размеров трубы. Формула (111) этому требованию не удовлетворяет в первую очередь потому, что содержит две неизвестные нам произвольные постоянные A и B. Для определения этих произвольных постоянных воспользуемся формулой (101), заметив, что на основании формул (101), (102) и (111):

$$\varepsilon_\rho=\frac{du}{d\rho}=A-\frac{B}{\rho^2}; \tag{112}$$

$$\varepsilon_\tau=\frac{u}{\rho}=A+\frac{B}{\rho^2}. \tag{113}$$

Тогда формула (105) примет вид:

$$\sigma_r=\frac{E}{1-\mu^2}\left[A-\frac{B}{\rho^2}+\mu\left(A+\frac{B}{\rho^2}\right)\right],$$

или

$$\sigma_r=\frac{E}{1-\mu^2}\left[A(1+\mu)-\frac{B}{\rho^2}(1-\mu)\right]. \tag{114}$$

Формула (106) дает:

$$\sigma = \frac{E}{1-\mu^2}\left[A(1+\mu) + \frac{B}{\rho^2}(1-\mu)\right]. \tag{115}$$

Для определения произвольных постоянных A и B нужны два граничных условия, которые легко получим из уравнения (114), заметив, что при $\rho = r$, т. е. на внутренней поверхности трубы, радиальное напряжение обращается во внутреннее давление, а на наружной поверхности трубы, т. е. при $\rho = R$, это напряжение обращается в наружное давление. Таким образом,

$$\begin{aligned} &\text{при } \rho = r \quad \sigma_r = -p_{\text{вн}}; \\ &\text{„} \quad \rho = R \quad \sigma_r = -p_{\text{н}}. \end{aligned} \tag{116}$$

Тогда из формул (114) и (116) получим два уравнения для определения неизвестных A и B:

$$\left.\begin{aligned} -p_{\text{вн}} &= \frac{E}{1-\mu^2}\left[A(1+\mu) - \frac{B}{r^2}(1-\mu)\right]; \\ -p_{\text{н}} &= \frac{E}{1-\mu^2}\left[A(1+\mu) - \frac{B}{R^2}(1-\mu)\right]. \end{aligned}\right\} \tag{117}$$

В уравнениях (117) знак минус в левых частях поставлен потому, что внешние усилия (в данном случае внутреннее и внешнее давления) всегда противоположны по направлению вызванным ими напряжениям. Решая систему уравнений (117) относительно A и B, получим:

$$\left.\begin{aligned} A &= \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{r^2 p_{\text{вн}} - R^2 p_{\text{н}}}{R^2 - r^2}; \\ B &= \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{R^2 r^2 (p_{\text{вн}} - p_{\text{н}})}{R^2 - r^2}. \end{aligned}\right\} \tag{118}$$

Располагая выражениями (118) для A и B, вообще говоря, поставленную задачу можно считать решенной, так как на основании уравнений (114), (115) и (111) можно получить искомые формулы для напряжений и деформаций через внешние усилия и размеры. Однако для практических приложений необходимо получить конкретные выражения искомых величин.

Подставляя выражения (118) в (114) и (115), получим для радиальных и окружных напряжений:

$$\sigma_r = \frac{r^2 p_{\text{вн}} - R^2 p_{\text{н}}}{R^2 - r^2} - \frac{R^2 r^2 (p_{\text{вн}} - p_{\text{н}})}{\rho^2 (R^2 - r^2)}; \tag{119}$$

$$\sigma = \frac{r^2 p_{\text{вн}} - R^2 p_{\text{н}}}{R^2 - r^2} + \frac{R^2 r^2 (p_{\text{вн}} - p_{\text{н}})}{\rho^2 (R^2 - r^2)}. \tag{120}$$

Подставляя эти же выражения в уравнение (111), получим формулу для деформации:

$$u=\frac{1-\mu}{E}\cdot\frac{r^2p_{вн}-R^2p_н}{R^2-r^2}\rho+\frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{R^2r^2(p_{вн}-p_н)}{(R^2-r^2)\rho}. \quad (121)$$

Уравнения (119), (120) и (121) являются основными для решения всех вопросов прочности и жесткости толстостенных труб. Для расчета артиллерийских устройств имеют большое значение частные случаи полученных формул при действии одного из давлений. В случае действия одного внутреннего давления ($p_н=0$) формулы принимают вид:

$$\sigma_r=\frac{p_{вн}r^2}{R^2-r^2}\left(1-\frac{R^2}{\rho^2}\right); \quad (122)$$

$$\sigma=\frac{p_{вн}r^2}{R^2-r^2}\left(1+\frac{R^2}{\rho^2}\right); \quad (123)$$

$$u=\frac{1-\mu}{E}\cdot\frac{r^2p_{вн}}{R^2-r^2}\rho+\frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{R^2r^2p_{вн}}{(R^2-r^2)\rho}. \quad (124)$$

Максимальные напряжения будут на внутренней поверхности трубы:

$$\sigma_{max}=p_{вн}\frac{R^2+r^2}{R^2-r^2}. \quad (125)$$

Это выражение имеет выдающееся техническое значение, показывая, что никаким увеличением толщины материала нельзя получить напряжения меньше внутреннего давления. В стволах, например, напряжения эти могут доходить до 4 000 *кг/см*^{2}, что вызывает необходимость применять высоколегированные материалы и многослойные трубы. Из формулы (123) легко убедиться подстановкой R вместо ρ, что минимальные напряжения на наружной поверхности будут значительно меньше, чем на внутренней; это свидетельствует о неблагоприятном распределении напряжений по сечению трубы.

В случае действия только наружного давления ($p_{вн}=0$), например при расчете многослойных стволов, формулы для расчета будут иметь вид:

$$\sigma_r=-\frac{p_н R^2}{R^2-r^2}\left(1-\frac{r^2}{\rho^2}\right); \quad (126)$$

$$\sigma=-\frac{p_н R^2}{R^2-r^2}\left(1+\frac{r^2}{\rho^2}\right); \quad (127)$$

$$u=-\frac{1-\mu}{E}\cdot\frac{R^2p_н}{R^2-r^2}\rho-\frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{R^2r^2p_н}{(R^2-r^2)\rho}. \quad (128)$$

Труба с дном

Во многих приложениях приходится рассчитывать трубы, имеющие дно. В этом случае к окружному и радиальному напряжениям, действующим в трубе, прибавится еще и продольное. Если растягивающее усилие обозначить через P, то продольное напряжение m определится так:

$$m = \frac{P}{\pi (R^2 - r^2)}. \tag{129}$$

Очевидно, продольное усилие P составляется из разности внутреннего и наружного давлений, действующей на дно:

$$P = \pi r^2 p_{\text{вн}} - \pi R^2 p_{\text{н}};$$

тогда

$$m = \frac{p_{\text{вн}} r^2 - p_{\text{н}} R^2}{R^2 - r^2}. \tag{130}$$

В этом случае придется рассматривать деформации уже по трем взаимно перпендикулярным направлениям (в отличие от ранее рассмотренных двух) — радиальному, окружному и продольному:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \frac{\sigma_r}{E} - \mu\frac{\sigma}{E} - \mu\frac{m}{E};\\ \varepsilon_\sigma &= \frac{\sigma}{E} - \mu\frac{\sigma_r}{E} - \mu\frac{m}{E};\\ \varepsilon_m &= \frac{m}{E} - \mu\frac{\sigma}{E} - \mu\frac{\sigma_r}{E} = \text{const}. \end{aligned}\right\} \tag{131}$$

Заметим, что последнее уравнение дает постоянное значение на основании гипотезы Бернулли, по которой поперечные сечения остаются плоскими.

Прежде всего покажем, что наличие продольных напряжений не изменяет величины окружных и радиальных напряжений. Для этого выразим значения σ_r и σ из первых двух уравнений (131) так:

$$\frac{\sigma_r}{E} = \varepsilon_\rho + \mu\frac{\sigma}{E} + \mu\frac{m}{E};$$

$$\frac{\sigma}{E} = \varepsilon_\sigma + \mu\frac{\sigma_r}{E} + \mu\frac{m}{E},$$

или

$$\frac{\sigma_r}{E} = \varepsilon_\rho + \mu\varepsilon_\sigma + \mu^2\frac{\sigma_r}{E} + \mu^2\frac{m}{E} + \mu\frac{m}{E} =$$

$$= \frac{1}{1-\mu^2}\left(\varepsilon_\rho + \mu\varepsilon_\sigma + \mu^2\frac{m}{E} + \mu\frac{m}{E}\right); \tag{132}$$

$$\frac{\sigma}{E} = \varepsilon_\tau + \mu\varepsilon_\rho + \mu^2\frac{\sigma}{E} + \mu^2\frac{m}{E} + \mu\frac{m}{E} =$$

$$= \frac{1}{1-\mu^2}\left(\varepsilon_\tau + \mu\varepsilon_\rho + \mu^2\frac{m}{E} + \mu\frac{m}{E}\right). \qquad (133)$$

Подставим их в третье из уравнений (131):

$$\varepsilon_m = \frac{m}{E} - \frac{\mu}{1-\mu^2}\left(\varepsilon_\tau + \mu\varepsilon_\rho + \mu^2\frac{m}{E} + \mu\frac{m}{E}\right) -$$

$$- \frac{\mu}{1-\mu^2}\left(\varepsilon_\rho + \mu\varepsilon_\tau + \mu^2\frac{m}{E} + \mu\frac{m}{E}\right) = \text{const}. \qquad (134)$$

Заметим, что напряжение m, в отличие от напряжений σ_r и σ, изменяющихся по поперечному сечению, всегда постоянно. Поэтому в последнем выражении можно перенести все постоянные в правую часть, объединив их общим символом const:

$$\varepsilon_\tau(1+\mu) + \varepsilon_\rho(1+\mu) = \text{const},$$

или

$$\varepsilon_\tau + \varepsilon_\rho = \text{const},$$

так как произведения в скобках также числа постоянные.

Подставляя в последнее уравнение значения ε_τ и ε_ρ из формул (101) и (102), получим:

$$\frac{u}{\rho} + \frac{du}{d\rho} = \text{const},$$

т. е. то же уравнение (110), имеющее решение, подобное (111):

$$u = A\rho + \frac{B}{\rho}. \qquad (135)$$

Следовательно, общий интеграл получился таким же, как и без осевого усилия; однако необходимо установить величину произвольных постоянных, о значении которых заранее сделать заключения нельзя. Для определения их рассмотрим выражение (132), подставив в него значения ε_ρ и ε_τ из формул (101) и (102):

$$\frac{\sigma_r}{E} = \frac{1}{1-\mu^2}\left(\frac{du}{d\rho} + \mu\frac{u}{\rho} + \mu\frac{m}{E} + \mu^2\frac{m}{E}\right).$$

Заменяя u и $\frac{du}{d\rho}$ их значениями из выражения (135), получим:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2}\left[A(1+\mu) - \frac{B}{\rho^2}\right](1-\mu) + \mu\frac{m}{E}(1+\mu).$$

При $\rho = r$ $\quad \sigma_r = -p_{\text{вн}}$;

„ $\rho = R$ $\quad \sigma_r = -p_{\text{н}}$.

Это дает систему уравнений для определения A и B:

$$-p_{вн}=\frac{E}{1-\mu^2}A(1+\mu)-\frac{B}{r^2}(1-\mu)+\mu\frac{m}{E}(1+\mu);$$

$$-p_{н}=\frac{E}{1-\mu^2}A(1+\mu)-\frac{B}{R^2}(1-\mu)+\mu\frac{m}{E}(1+\mu),$$

откуда

$$A=\frac{1-\mu}{E}\cdot\frac{p_{вн}r^2-p_{н}R^2}{R^2-r^2}-\mu\frac{m}{E}; \tag{136}$$

$$B=\frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{(p_{вн}-p_{н})R^2r^2}{R^2-r^2}. \tag{137}$$

Произвольная постоянная B не изменилась по сравнению с уравнением для трубы без дна, постоянная же A изменилась. Подстановкой значений A и B в уравнения (132) и (133) получим:

$$\sigma_r=\frac{p_{вн}r^2-p_{н}R^2}{R^2-r^2}-\frac{(p_{вн}-p_{н})R^2r^2}{\rho^2(R^2-r^2)}; \tag{138}$$

$$\sigma=\frac{p_{вн}r^2-p_{н}R^2}{R^2-r^2}+\frac{(p_{вн}-p_{н})R^2r^2}{\rho^2(R^2-r^2)}, \tag{139}$$

т. е. те же самые выражения, что и для трубы без дна. Результат этот вполне соответствует характеру работы трубы с дном. Для деформации же u получится новое выражение:

$$u=\left(\frac{1-\mu}{E}\cdot\frac{p_{вн}r^2-p_{н}R^2}{R^2-r^2}-\mu\frac{m}{E}\right)\rho+$$

$$+\frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{(p_{вн}-p_{н})R^2r^2}{(R^2-r^2)\rho}, \tag{140}$$

или для важнейшего в практике случая — отсутствия наружного давления:

$$u=\left(\frac{1-\mu}{E}\cdot\frac{p_{вн}r^2}{R^2-r^2}-\mu\frac{m}{E}\right)\rho+\frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{p_{вн}R^2r^2}{(R^2-r^2)\rho}. \tag{141}$$

Из формулы (141) можно получить радиальную деформацию для любой точки трубы. Продольная деформация при известных выражениях (136) и (137) получится по уравнению (134). Напряжения в опасном сечении трубы с дном находятся суммированием всех трех действующих напряжений при помощи одной из теорий прочности. Для стволов продольное напряжение m вообще невелико по сравнению с радиальными и окружными напряжениями σ_r и σ.

§ 24. ОБЩИЕ ОСНОВАНИЯ УСТРОЙСТВА И РАСЧЕТА СТВОЛОВ

А. ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВА СТВОЛА

Для производства выстрела необходимо наличие закрытой с одной стороны металлической трубы. Такой трубой и является ствол орудия или стрелкового оружия, закрытый при выстреле с одной стороны затвором.

Внутреннее пространство ствола называется *каналом* и состоит из трех частей: 1) каморы, где помещается заряд пороха; 2) нарезной части, в которой происходит расширение газов и снаряду сообщается поступательное и вращательное движения, и 3) соединительного конуса между каморой и нарезной частью.

Калибр орудия, т. е. диаметр канала по полям нарезов, определяется тактическим назначением орудия и изменяется в весьма широких пределах (приблизительно от 2 до 52 *см*). Калибр стволов стрелкового оружия в среднем составляет 8 *мм*, увеличиваясь для специальных видов оружия.

Длина канала ствола в калибрах исчисляется от дна каморы до дульного среза, т. е. до открытого конца ствола. Определяется длина канала необходимой при данном калибре дульной энергией. Энергия пороха используется тем больше, чем больше часть канала, в которой расширяются газы. Поэтому в морских и зенитных орудиях, в которых при больших зарядах требуется достижение максимально возможной дульной энергии, применяются стволы длиной свыше 50 калибров. С уменьшением величины заряда уменьшается и необходимая длина ствола. Так, для гаубицы достаточен ствол в 13—25 калибров, а для мортиры — в 8—12 калибров. Стволы стрелкового оружия, создающие относительно высокую дульную энергию, обычно бывают длиной:

винтовочные стволы . . . . . 80—120 калибров
пулеметные „ . . . . . 70—90 „

Нарезка служит для сообщения снаряду и пуле необходимого вращательного движения и состоит из нарезов и полей, которые врезаются в ведущий поясок снаряда или ведущую часть пули. Нарезки орудийных стволов бывают *постоянные*, у которых наклон нарезов по отношению к продольной оси остается постоянным, и *прогрессивные*, у которых наклон возрастает по направлению к дулу. Прогрессивные нарезки делаются для уменьшения давления между выступами пояска и боевыми гранями во время максимального давления газов. Преимущество нарезки последнего типа особенно сказывается по мере износа ствола, но она в малокалиберном оружии не применяется.

Ширина поля нарезки для крупных и средних калибров составляет 3—4,5 *мм*, а для малых — 2,5 *мм*. Отношение ширины нареза к ширине поля берется от 1,5 до 2. Число нарезов приблизительно равно утроенному числу сантиметров, заключаю-

щемуся в калибре, и обязательно должно быть кратным 4, так как одновременно нарезаются четыре нареза. Глубина нарезов равна от 0,006 до 0,01 калибра.

В стволах стрелкового оружия нарезка имеет постоянную крутизну в 5°30′ — 6°; ширина полей — от 1,8 до 2,5 *мм*; глубина нарезов — от 0,1 до 0,2 *мм*. Число нарезов: для калибров 6,5—8 *мм* — 4, для калибров 11—13 *мм* — 6—8.

Камора служит для помещения заряда, и объем ее определяется весом заряда и плотностью заряжания. В случае применения нитроглицеринового пороха плотность заряжания должна быть уменьшена.

При определении объема каморы в случае гильзовой обтюрации необходимо учесть и объем гильзы, составляющий от 6 до 10% каморы при раздельном заряжании и от 12 до 15% при унитарном патроне. Для винтовочных и пулеметных патронов объем металла гильзы составляет от 30 до 40% каморы.

Существует два типа конструкции каморы:

1) диаметр каморы минимальный, превосходящий калибр только на 5—6%, без чего невозможно заряжание; в этом случае камора, а следовательно, и патрон получаются длинными, но усилие на затвор минимальным; это определяет малый вес затвора;

2) диаметр каморы на 20—50% больше калибра, что приводит к коротким каморе и гильзе, создает удобства при заряжании, но зато усилие на затвор возрастает.

При проектировании автоматического оружия, устанавливая размеры патрона, необходимо согласовать два противоречивых требования: возможно более короткий патрон, как наиболее удобный для заряжания, и малое усилие на затвор.

Для беспрепятственного экстрактирования гильз из стволов с патронным заряжанием продольные очертания каморы выполняются слегка коническими.

Ствол в целом представляет толстостенную трубу, подверженную внутреннему давлению, причем, как это видно из кривой $p(x)$ давления газов (см. рис. 12), давление это падает по направлению к дулу.

Максимальное давление газов достигает 3 500 *кг/см*^{2} для орудийных стволов и 4 000 *кг/см*^{2} для стволов стрелкового оружия.

Как известно, материал толстостенной трубы, подвергнутой внутреннему давлению, работает в крайне невыгодных условиях вследствие огромных напряжений на внутренних слоях при почти неработающих наружных. Поэтому только стволы стрелкового оружия и малокалиберных пушек выполняются в виде обыкновенных однослойных стволов (моноблок). Артиллерийские же стволы изготовляются так, чтобы достигалось наилучшее распределение напряжений, а следовательно, и наименьший вес конструкции. Для стволов стрелкового оружия эти способы не применяются ввиду малого веса таких стволов, что делает возможный выигрыш в весе неэквивалентным затратам на усложнение конструкции.

Для артиллерийских стволов применяются три способа улучшения условий работы материала.

1. В стволе создаются предварительные напряжения сжатия благодаря насадкам на ствол одной или нескольких труб. Такие стволы носят название многослойных скрепленных. Обычно наружные трубы (числом не более трех) имеют длину меньшую, чем первая, покрывая только наиболее напряженные части ствола.

2. В стволе создаются предварительные напряжения скреплением нескольких труб проволокой. На внутреннюю трубу навивают с заданным натяжением плоскую проволоку, а сверх нее насаживают еще одну трубу или кожух, также с натягом. Такой способ, принятый в Англии и отчасти в Америке, технологически проще первого, но стволы, скрепленные проволокой, имеют относительно меньшую жесткость и скорее изнашиваются.

3. Автофретаж, применяемый для однослойных стволов. Сущность автофретажа заключается в том, что ствол под гидравлическим давлением или прогонкой пуансонов подвергают напряжениям, бо́льшим предела упругости, отчего, как известно, предел упругости возрастает примерно до величины сообщенных напряжений, и, кроме того, происходит наклеп, повышающий предел текучести. Следовательно, механические свойства автофретированного ствола значительно улучшаются.

Б. ОСНОВАНИЯ РАСЧЕТА СТВОЛА

Несмотря на динамический характер действующих на ствол нагрузок, расчет ствола ведется на статические нагрузки. Объясняется это тем, что установленные по опыту запасы прочности относятся к статическим расчетам, и если перейти к более правильному динамическому расчету, то пришлось бы заново определять коэфициенты запаса прочности. Эти коэфициенты, естественно, будут иными, нежели существующие.

Запас прочности в стволах назначается способом, отличным от принятого в сопротивлении материалов. Обычно напряжения в материале определяются на основании фактически действующих усилий, и запас прочности вводится путем назначения допускаемого напряжения, составляющего некоторую часть предела текучести. Отношение предела текучести к допускаемому напряжению и дает запас прочности. При расчете стволов запас прочности вводится в нагрузку, т. е. кривая давления газов перестраивается в *кривую желаемого сопротивления ствола* так, что каждая ордината новой кривой равна произведению ординаты старой кривой на коэфициент запаса прочности.

Допускаемое же напряжение берется без запаса, т. е. непосредственно равным пределу текучести или пределу упругости. Обычный для стволов коэфициент запаса прочности берется в пределах 1,25 — 1,50. Таким образом, при расчете стволов пользуются значительно более низким запасом прочности, чем при

расчете ответственных деталей общего машиностроения, где запас прочности меньший 2 не берется. Объясняется это, на первый взгляд парадоксальное, обстоятельство следующим.

1. Расчет всех вообще деталей ведется на основании механических характеристик материала (предела упругости, текучести и т. д.), определенных на основании статических испытаний, а между тем может считаться непреложно установленным, что при действии динамической нагрузки пределы упругости и текучести возрастают примерно на 20—30%.

2. Действие газов в условиях высоких температур при выстреле кратковременно; поэтому ствол полностью завершить деформацию не успевает, и остаточные деформации получает только тонкий внутренний слой трубы, т. е. происходит явление, аналогичное автофретажу, — своеобразный „естественный" автофретаж. При этом, как и при обычном искусственном автофретаже, повышается предел упругости до напряжения, вызвавшего остаточные деформации.

3. Как будет выяснено ниже, срок службы ствола определяется в значительной степени различными видами износа; поэтому применение больших запасов прочности, не могущих повлиять на износ, но приводящих к недопустимому утяжелению системы, признается нерациональным.

При расчете моноблоков, свободных от предварительных напряжений, обычно принимают допускаемое напряжение равным пределу текучести, а при расчете составных и автофретированных стволов — равным пределу упругости, учитывая более раннее появление в них остаточных деформаций.

Формулы для определения напряжений в простой и многослойной трубах выведены в предыдущем параграфе.

Максимальное напряжение внутри трубы будет равно [см. формулу (125)]:

$$\sigma_{max} = p_{вн} \frac{r^2 + R^2}{R^2 - r^2}.$$

Радиальное напряжение в этой точке, очевидно, будет меньшим и равным

$$\sigma_r = -p_{вн}.$$

Вопрос о прочности моноблока полностью решается этими формулами, однако применение их определяется выбором соответствующей теории прочности. Из широко известных трех теорий прочности при расчете стволов применяется главным образом вторая теория.

Причины применения на практике второй теории прочности нуждаются в более подробном пояснении. Среди теорий прочности вторая теория — одна из самых слабых. Но качество теории прочности оценивается обычно по тому, насколько точно можно судить (на основании опытов над простым растяжением и сжатием) о сложном напряженном состоянии.

При таком критерии вторая теория, несомненно, не дает удовлетворительных результатов. Однако использование второй теории при расчете стволов обусловлено совсем другими предпосылками. Допускаемые напряжения в стволах назначаются не на основе испытания материала ствола на простое растяжение и сжатие, а на основе испытания самого ствола в целом. При таких условиях выбор теории прочности уже не имеет особого значения.

В самом деле, на основании теории прочности, по действующим осевым, радиальным и окружным напряжениям вычисляется некоторое приведенное напряжение, как единая характеристика работы ствола. Пусть, например, при одних и тех же размерах приведенные напряжения для ствола, вычисленные по различным теориям прочности, оказались: по второй R_1', по третьей R_2', по энергетической R_3'; испытанный на разрушение ствол этот разрушился при напряжениях R'. Тогда запасы прочности для каждой из теорий прочности будут равны:

$$n_1 = \frac{R'}{R_1'};\quad n_2 = \frac{R'}{R_2'};\quad n_3 = \frac{R'}{R_3'},$$

где, конечно, $n_1 \neq n_2 \neq n_3$.

Ствол будет иметь совершенно одинаковые размеры, по какой бы теории его ни рассчитывать, конечно, при соответствующей величине n. Для стволов имеющиеся опытные данные относятся именно ко второй теории, вследствие чего при пользовании ею и получаются правильные размеры. Из изложенного вытекает, что при расчете стволов на сложное напряженное состояние можно пользоваться той теорией прочности, для которой есть опытные данные, и что выбор теории прочности имеет здесь второстепенное значение (как и для любого сооружения, рассчитываемого не на основании испытания материала, а на основании испытания всей конструкции).

Из новых теорий в последнее время начинают применять энергетическую теорию прочности, или теорию Генки — Губер — Мизеса, наиболее точно соответствующую опытным данным. Критерием прочности в ней принята потенциальная энергия системы. Такой критерий вполне логичен с теоретической точки зрения, а так как он наиболее подтверждается опытом, то заслуживает внимания. Уравнение этой теории прочности имеет вид:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2R'^2,$$

где σ_1, σ_2, σ_3 — главные напряжения [1].

Приведем расчетные формулы для моноблока, как наиболее распространенного в авиационном вооружении, по второй, третьей и энергетической теориям прочности.

---

[1] С. В. Серенсен, Прочность металла и расчет деталей машин, ОНТИ, 1937, стр. 41.

В расчете заданные величины следующие: внутренний радиус, давление и допускаемое напряжение; искомая — наружный радиус. Поэтому наиболее удобно применить формулы, сразу определяющие наружный радиус.

Вторая теория

Условие прочности:

$$\sigma - \mu\sigma_r = R'. \tag{142}$$

На основании приведенных выше формул для σ и σ_r

$$p_{вн}\frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \mu p_{вн} = R';$$

принимая коэффициент Пуассона $\mu = 1/3$ и преобразуя это выражение, получим:

$$R = r\sqrt{\frac{R' + 0{,}7\,p_{вн}}{R' - 0{,}3\,p_{вн}}}. \tag{143}$$

Третья теория

Условие прочности:

$$\sigma - \sigma_r = R', \tag{144}$$

или

$$p_{вн}\frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + p_{вн} = R',$$

откуда

$$R = r\sqrt{\frac{R'}{R' - 2p_{вн}}}. \tag{145}$$

Энергетическая теория

Условие прочности при $\sigma_3 = 0$:

$$(\sigma - \sigma_r)^2 + \sigma_r^2 + \sigma^2 = 2R'^2, \tag{146}$$

или после преобразований:

$$R = r\sqrt{\frac{R' + p_{вн}}{R' - 3p_{вн}}}. \tag{147}$$

В тех случаях, когда в формулах (143), (145) и (147) в знаменателях получается малая разность двух больших чисел, во избежание ошибки вычислений ими пользоваться не следует, а надо рассчитывать непосредственно по формулам (146), (144) и (142).

В случае многослойного ствола все необходимые формулы берут также из курса сопротивления материалов, но расчет обычно носит поверочный характер, т. е. по данным практики, в соответствии с выполненными аналогичными конструкциями, задаются размерами многослойной трубы и проверяют возни-

кающие в ней напряжения. Внешнюю трубу надевают на внутреннюю с натягом, обеспечивающим возникновение между ними напряжения, выбираемого по принципу равнопрочности.

В. ДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При горении пороха в канале ствола развивается температура, достигающая 3 000°. Различные слои ствола испытывают влияние этой температуры не в одинаковой степени, вследствие чего в стволе возникают температурные напряжения. Процесс теплопередачи при этом неустановившийся, а потому надежно теоретически определить температурные напряжения невозможно, хотя принципиально задача эта в теории упругости и разрешена. Поэтому температурные напряжения не учитываются при расчете ствола на прочность, несмотря на их большую величину и весьма существенное влияние на сроки службы ствола.

Для оценки влияния температур заметим, что в момент выстрела газовый поток передает поверхности канала ствола настолько большое количество тепла, что значительная часть его за малое время выстрела не успевает проникнуть в глубь стенок. Вследствие этого происходит концентрация тепла в очень тонком поверхностном слое стенки.

Вслед за прекращением теплового воздействия происходит выравнивание температур между внутренней и наружной поверхностями трубы, зависящее от теплопроводности металла. Чем выше теплопроводность металла, тем ниже температура внутреннего слоя. Вследствие нагрева внутренней поверхности ствола происходит тепловое расширение тонкого внутреннего слоя. А это расширение вызывает деформации сжатия, так как остальная масса ствола почти не принимает участия в тепловом расширении.

Температура внутреннего расширяющегося слоя бывает настолько высокой, что образовавшиеся деформации сжатия становятся остаточными. После образования этих остаточных деформаций происходит тепловое выравнивание, в результате чего внутренний слой должен вернуться в положение, занимаемое им до выстрела, т. е. сжаться на ту же самую величину, на которую он раньше расширился. Но сжаться на эту величину внутренний слой мог бы только в том случае, если бы вся деформация, сопровождавшая его тепловое расширение, была упругой. Однако часть ее на самом деле является пластической, и потому во внутреннем слое возникнут напряжения растяжения, соответствующие величине остаточной деформации.

Следовательно, во внутреннем слое трубы в результате теплового действия газов возникают знакопеременные тепловые напряжения растяжения — сжатия. Это означает, что внутренний слой работает в условиях, вызывающих при соответствующем числе перемен нагрузок усталость металла. В самом деле, металлографическое исследование трещин, обнаруживаемых в стволах огнестрельного оружия, показывает, что они пред-

ставляют собой результат ярко выраженного хрупкого излома материала нормальной вязкости, а, как известно, такие разрушения есть результат действия усталостных напряжений.

Для орудийных сталей предел усталости (т. е. напряжение, при котором разрушение от усталости не наступает, вне зависимости от числа перемен нагрузок) лежит ниже фактически действующих напряжений, и потому усталостные разрушения неизбежны. Это усугубляется еще и действием коррозии, понижающей предел усталости и неизбежной при сгорании пороха. Кроме того, наличие нарезки также отрицательно влияет на предел усталости, понижая его величину аналогично надрезу.

Избежать усталостных напряжений можно было бы только при огромном снижении температуры горения, что практически невозможно. Заметим, что увеличение размеров ствола желаемых результатов не даст, так как усталостные разрушения происходят на внутренней поверхности ствола и с увеличением толщины ствола будут только возрастать вследствие дальнейшего ухудшения теплообмена.

Г. ЖИВУЧЕСТЬ СТВОЛА

В правильно спроектированных стволах огнестрельного оружия во время работы возникают недопустимые остаточные деформации, и предельный срок службы ствола определяется не появлением этих деформаций или разрывом ствола, а другими причинами, не отраженными в расчете. Эти причины, известные под общим названием *износа,* приводят к постепенному разрушению нарезной части канала, вследствие чего меткость и начальная скорость падают до пределов, делающих дальнейшее использование ствола невозможным.

Живучесть современных орудийных стволов малой и средней мощности доходит до нескольких тысяч выстрелов; для полевых пушек большой мощности — до сотен, а для морских крупнокалиберных пушек — до десятков выстрелов. Живучесть винтовочных стволов колеблется в пределах 10 000—20 000 выстрелов; такую же примерно живучесть имеют и пулеметные стволы с водяным охлаждением.

На живучесть ствола огромное влияние оказывает характер стрельбы. Так, при непрерывной стрельбе срок службы даже винтовки может быть понижен до 5 000 выстрелов. Особенно сильно падает живучесть стволов при непрерывной стрельбе из пулеметов с воздушным охлаждением, достигая 2 000—3 000 выстрелов и даже меньше. Из изложенного ясна первостепенная важность исследования явлений износа и мер его уменьшения.

Износ стволов заключается в следующем:

1) истирание поверхности канала и главным образом полей нарезов вследствие движения пули или снаряда;

2) образование поверхностных трещин, особенно в начале нарезки, приводящих к выкрашиванию металла;

3) коррозия ствола, т. е. разрушение металла вследствие химического воздействия окружающей среды;

4) эрозия ствола („разгар", „выгорание"), т. е. механическое истирание вследствие воздействия газовой среды.

Стволы стрелкового оружия подвергаются чисто механическому износу, которому способствует образование легкой сетки трещин в результате усталости металла.

Коррозионные и эрозионные разрушения, как правило, в самостоятельном виде отсутствуют. Следовательно, основой износа здесь является процесс трения. Трение, а значит в данном случае и износ, зависит от ряда факторов, из которых решающее значение имеет температура, с повышением которой износ сильно возрастает. Некоторое значение имеют конструкция и материал пули, особенно при излишнем форсировании и повышенной прочности. Из материалов ведущей части пули, повидимому, наилучшие результаты дает медь в качестве покрытия стали. Несомненное значение имеют также темп стрельбы, теплосодержание пороха и охлаждение ствола. Понятно, что последние два вопроса тесно связаны с температурой ствола.

В орудийных стволах главной причиной износа является образование сетки трещин с последующим выкрашиванием полей и эрозия как в сочетании с первой причиной, так и самостоятельно, особенно в стволах орудий большой мощности. Доминирующей причиной образования указанных факторов является высокая температура. Для понижения температуры орудий необходимо принимать все возможные меры к наиболее полной обтюрации ведущего пояска, так как при прорыве газов повышается температура и создается эрозия.

Важное значение имеет и выбор пороха, причем пироксилиновый обладает несомненными преимуществами перед нитроглицериновым.

Борьба с износом материала огнестрельного оружия заключается в правильном выборе материала, охлаждения и рациональной конструкции. В авиационном оружии применяется исключительно воздушное охлаждение, дающее по сравнению с водяным слабый эффект.

Несмотря на ряд мер, принимаемых против износа, живучесть стволов остается крайне низкой; поэтому в артиллерии применяется способ восстановления изношенных стволов, известный под названием *лайнирования.*

Изношенную трубу орудия рассверливают и в нее запрессовывают тонкостенную трубу. Такой способ восстановления дает прекрасные результаты, но может быть осуществлен только на орудийном заводе.

Значительно больший интерес представляет восстановление ствола при помощи сменяемого лайнера, предусмотренного самой конструкцией ствола. Наличие таких лайнеров необходимо в особенности для зенитной артиллерии. Наиболее интересны по конструкции лайнеры, вставляемые с радиальным зазором, т. е. *свободные лайнеры,* примененные впервые Обуховским заводом для полевых пушек образца 1870 г. На зна-

чительном протяжении по длине лайнера имеется радиальный зазор по отношению к оболочке. Поэтому он входит в нее свободно почти по всей своей длине, за исключением короткой части, предназначенной для закрепления,во избежание проворота и продольного смещения. Во время выстрела лайнер расширяется свободно до тех пор, пока величина деформации его наружной поверхности не станет равной зазору. С этого момента лайнер плотно прилегает к оболочке, а при дальнейшем возрастании давления ствол, состоящий из лайнера и оболочки, работает как одно целое.

Величина зазора должна быть возможно меньшей, обеспечивая только беспрепятственное вынимание лайнера. В пушках Шнейдера величина зазора составляет 0,001 калибра, а толщина стенок лайнера — 0,1 калибра.

Д. ВЫБОР МАТЕРИАЛА СТВОЛА

Выбор рационального материала для ствола при проектировании огнестрельного оружия имеет особенное значение ввиду больших напряжений, при которых работает материал ствола, и целого ряда специальных требований, к нему предъявляемых.

При выборе конструкции ствола конструктор, безусловно, не может ограничиться фиксацией принятого напряжения, как это допустимо делать во многих случаях общего машиностроения. Особенности работы ствола требуют наличия специальных свойств материала, тесно связанных с определенной конструкцией, видом пороха, величиной заряда и т. п. К материалу ствола огнестрельного оружия могут быть предъявлены некоторые общие требования, из которых главнейшие: большое сопротивление усталости и истиранию при действии высоких температур. Оба эти свойства тесно связаны со способностью материала к упрочнению. Помимо того, материал ствола, подверженный динамической нагрузке, должен обладать высокой вязкостью в условиях пластической деформации. Следует отметить, что ствол из стали с весьма высоким пределом текучести, но с малой вязкостью может при стрельбе разорваться.

Требование высокой вязкости отвечает также стремлению обезопасить орудийные расчеты в случаях ненормального повышения давления из-за применения излишнего заряда пороха, заклинения снаряда в канале или преждевременного разрыва снаряда в канале, имеющего характер детонации.

Во всех этих случаях при достаточно вязком материале наблюдается раздутие, а не разрыв ствола (за исключением детонации снаряда, снаряженного разрывными зарядами значительного веса).

Для стволов стрелкового оружия наиболее широко применяется углеродистая сталь с содержанием: углерода 0,6—0,7%, марганца 0,5—0,7% либо вольфрама 2%. Такая сталь имеет временное сопротивление $\sigma_{вр} = 8000$ *кг/см*^{2} и предел текучести $\sigma_t = 5000$ *кг/см*^{2} при удлинении в момент разрыва в 15%.

Для стволов с воздушным охлаждением, температура которых может достигать 400°—500°, необходимо уменьшать допускаемые напряжения на 20%, учитывая падение предела текучести с повышением температуры.

При изготовлении орудийных стволов главные трудности представляет обработка больших поковок стали. Поэтому для достижения необходимых механических свойств ствола требуется:

$$\sigma_{вр} = 6500—7000 \ кг/см^2$$

$$\sigma_t = 3000—4000 \quad „$$

$$\varepsilon = 15\%.$$

В зависимости от способа термической обработки применяют различные составы стали; главнейшие легирующие включения — марганец, кремний и хром.

Е. ВИБРАЦИИ СТВОЛА

В стволе огнестрельного оружия возможно возникновение четырех видов колебаний: продольных, радиальных, крутильных и поперечных. Можно считать установленным, что ввиду огромной жесткости стволов в продольном и радиальном направлениях частоты этих колебаний крайне высоки и потому практического значения не имеют. Так, например, частота радиальных колебаний ствола 12-дюймовой пушки 3 000 в секунду.

Крутильные колебания также не оказывают сколько-нибудь ощутительного влияния. Значение имеют только поперечные колебания, особенно для автоматического оружия и длинных пушек малого калибра. При одиночной стрельбе поперечные колебания оказывают влияние на меткость стрельбы, так как пули или снаряды будут вылетать при различных положениях конца ствола, перемещающегося вследствие вибраций. Это явление будет тем меньше, чем медленнее темп стрельбы, так как тогда колебания ствола будут успевать затухнуть между выстрелами. При автоматической стрельбе можно опасаться попадания колебаний ствола в резонанс с темпом стрельбы, что приведет к значительному снижению меткости и даже к поломкам.

Опытом установлено, что у винтовки Маузера частота колебаний ствола 1 440 в минуту, что лежит в пределах скорострельности современного стрелкового оружия. Поэтому знание частоты собственных колебаний ствола крайне важно. Однако при решении этого вопроса сталкиваются с большими математическими трудностями, ввиду того, что ствол есть стержень переменного сечения. Определение частоты его собственных колебаний требует интегрирования системы дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэфициентами, что может быть выполнено только численно и требует кропотливых выкладок. Приближенные же методы определения

частоты собственных колебаний не дают приемлемого совпадения с данными опытов и потому также не заслуживают внимания.

В настоящее время вибрации ствола исследуют экспериментально. Техника экспериментального определения частоты колебаний ствола весьма проста и не требует специальной аппаратуры, за исключением движущейся с известной скоростью ленты.

Исследуемый пулемет или орудие жестко закрепляют в турели и к концу ствола прикрепляют карандаш для записи на ленте. После этого каким-либо образом создают колебания ствола, которые и будут записаны соединенным со стволом карандашом на движущейся ленте. Зная время прохождения лентой 1 *см*, определяют величину периода и затем частоты колебаний.

Глава V

ДЕТАЛИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

§ 25. ПРУЖИНЫ

Пружины являются неотъемлемой частью современного автоматического оружия. Основную роль играют возвратные пружины, служащие для аккумулирования части энергии, которая получена при выстреле и затем используется для возвращения автоматики в исходное положение. Помимо возвратных пружин, применяются пружины для выбрасывателей, спусковых механизмов, для подачи патронов и т. п.

Разнообразное назначение пружин и связанное с этим конструктивное многообразие их не позволяют описать все имеющиеся типы пружин. В настоящем параграфе изложены лишь принципы расчета важнейших типов пружин. При использовании излагаемых ниже методов расчета следует помнить, что они имеют приближенный характер и могут применяться главным образом как материал для сравнения, что, впрочем, для практических целей достаточно.

Приближенный характер теории расчета пружин автоматического оружия определяется в первую очередь тем, что пружины считаются работающими в пределах закона Гука. В действительности допускаемое напряжение для пружин избирается близким к пределу пропорциональности и иногда его превосходящим, что приводит к образованию в пружинах остаточных деформаций и ограничивает срок их службы. Такой способ конструирования пружин неизбежен ввиду необходимости получения от них, при относительно малых размерах, больших деформаций и большой способности к аккумулированию энергии.

Второй причиной, обусловливающей приближенный характер расчета пружин, являются потери на внутреннее трение при работе пружин. В расчете принимают, что вся энергия, накопленная в пружине при деформации, будет отдана ею при возвращении в исходное положение. Однако на основании опытов следует, что даже при одном возвратном движении пружины только на преодоление внутреннего трения тратится 10% энергии, причем сюда не входят потери на неизбежное внешнее трение, удары и т. п.

Указанные причины приводят к тому, что совершенно правильно рассчитанную пружину приходится „подтягивать“, „до-

водить", а часто и заменять новой после сравнительно короткого срока службы. Предлагаемым ниже методом рассчитано весьма много пружин автоматического оружия, удовлетворительно работавших при соответствующем монтаже. Практически это объясняется правильным назначением входящих в расчет характеристик материала: допускаемого напряжения и модуля упругости. Однако все же следует помнить, что расчет не может дать абсолютных данных, особенно в отношении деформации или осадки пружины.

А. ВИНТОВАЯ ПРУЖИНА

Рассмотрим расчет винтовой пружины, изображенной на рис. 57.

Обозначим:

R — радиус винтовой оси пружины;

r — радиус поперечного сечения пружины;

n — число витков пружины;

G — модуль сдвига;

P — сила, сжимающая или растягивающая пружину.

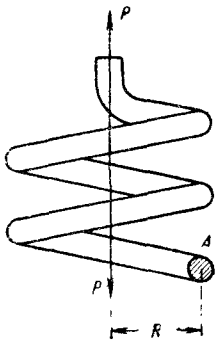


Рис. 57. Винтовая пружина.

Приложим в точке A — центре тяжести поперечного сечения пружины — две силы, равные по величине силе P, но направленные в противоположные стороны. Тогда в материале пружины возникнут срезывающие касательные напряжения от силы P и напряжения кручения от пары PR.

Складывая эти напряжения для точки, лежащей на поверхности стержня пружины, где напряжения кручения имеют максимальные значения (срезывающие напряжения от силы P постоянны по сечению), получим:

$$\tau = \frac{P}{\pi r^2} + \frac{2PR}{\pi r^3} = \frac{P}{\pi r^2}\left(1 + \frac{2R}{r}\right). \qquad (148)$$

Второе слагаемое в скобках значительно больше единицы, поэтому единицей пренебрегают и расчет ведут на напряжение

$$\tau = \frac{2PR}{\pi r^3}, \qquad (149)$$

т. е. рассчитывают пружины на чистое кручение, пренебрегая напряжениями от среза ввиду их малости.

Формулу (149), полагая $2R = D$ и $2r = d$, часто применяют в виде:

$$\tau_д = \frac{PD}{0{,}4d^3}, \qquad (150)$$

где $\tau_д$ — допускаемое напряжение, принимаемое для пружин автоматического оружия в пределах 8 000—10 000 *кг/см*^{2}.

В общем машиностроении величину $\tau_д$ не берут больше 7 000 *кг/см*^{2}, так как вопросы габарита пружины стоят там не так остро, как в оружии, и большее значение имеет долговечность.

Само собой разумеется, что применение таких высоких напряжений требует использования в качестве материала для пружин сталей, имеющих временное сопротивление 13 000—15 000 *кг/см*^{2} при удлинении в момент разрыва не менее 5%. Термообработка пружины должна обеспечить высокий предел пропорциональности и отсутствие остаточных термических напряжений при закалке. Указанным требованиям стали наших заводов вполне удовлетворяют.

Для определения деформации пружины f (осадки или поджатия) предположим, что работа действующей на пружину силы переходит в потенциальную энергию пружины.

Потенциальная энергия закручиваемого стержня, как известно, выражается формулой

$$U = \frac{M_к^2 l}{2 I_p G}, \tag{151}$$

где l — длина стержня;

$I_p = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi r^4}{2}$ — полярный момент инерции;

$M_к = PR$ — крутящий момент.

Тогда

$$\frac{Pf}{2} = \frac{M_к^2 l}{2 I_p G}.$$

Полагая приближенно длину пружины $l = 2\pi Rn$, получим:

$$f = \frac{64 n R^3}{d^4} \cdot \frac{P}{G}; \tag{152}$$

если поджатие пружины f является величиной заданной, то получим число витков пружины

$$n = \frac{f d^4}{64 R^3} \cdot \frac{G}{P}. \tag{153}$$

С учетом наклона винтовой линии полная длина пружины определится формулой

$$l = \frac{2\pi Rn}{\cos \alpha}, \tag{154}$$

где α — угол подъема винтовой линии пружины.

Предварительное поджатие возвратной пружины f_0 обычно берут несколько больше половины хода пружины; в оружии $\lambda = f - f_0$.

Полная работа пружины будет определяться очевидными зависимостями:

$$U=\frac{P+P_0}{2}(f-f_0)=\frac{P+P_0}{2}\lambda, \qquad (155)$$

где P_0 — усилие предварительного поджатия.

Если известно количество работы, которую должна поглотить пружина, то может оказаться полезной формула, связывающая объем пружины Δ с допускаемым напряжением $\tau_д$ и сразу показывающая, сможет ли пружина при данных размерах аккумулировать нужное количество энергии:

$$U=\frac{\tau_д^2}{4G}\Delta. \qquad (156)$$

Если пружина прямоугольного сечения со сторонами b и h, причем $b<h$, что может быть в автоматике крупных калибров и в амортизаторах, то расчетные формулы примут вид:

$$\tau_д=\frac{PR}{\alpha b^3}; \qquad (157)$$

$$f=\frac{2\pi n R^3 P}{\beta b^4 G}, \qquad (158)$$

где значения коэфициентов α и β определяются таблицей 10.

Таблица 10

$\frac{b}{h}$	α	β
1	0,208	0,140
$^2/_3$	0,231	0,196
$^1/_2$	0,245	0,229
$^1/_3$	0,267	0,463

Б. ДРУГИЕ ВИДЫ ПРУЖИН

Помимо винтовых пружин, в оружии встречаются еще и пластинчатые пружины, применяемые в спусковых, ударных, выбрасывающих и подающих механизмах. Пружины эти работают на изгиб, представляя собой различного сечения балки, закрепленные одним концом. Напряжения, деформации (стрелы прогиба) и потенциальная энергия определяются в них по обычным формулам сопротивления материалов и специальных пояснений не требуют.

Если пружины — сложной формы, представляя комбинацию нескольких пластинчатых пружин, как, например, пружины подающих механизмов или двуперые боевые пружины, то расчет их вполне аналогичен расчету ломаных балок.

Прогиб или осадку такой пружины рациональнее всего определять при помощи интеграла Мора, а потенциальную энергию вычислять по известной формуле сопротивления материалов:

$$U = \int_l \frac{M^2\,dx}{EI}, \tag{159}$$

где интеграл этот следует составлять для каждой пластинки отдельно.

Однако необходимо помнить, что расчет сложных составных пружин значительно менее точен, чем расчет простых пружин. Дело в том, что при термической обработке тонкой пружины сложной формы модуль упругости материала не может считаться постоянным, и обычные методы определения деформации здесь неприменимы.

Изложенное относится также к спиральным пружинам, для которых даже относительно мало точное определение деформации аналитическим путем затруднительно. Повидимому, наиболее правильный метод подбора, особенно сложных пружин, должен базироваться на экспериментальных данных.

В. ВИБРАЦИЯ ПРУЖИН

Значительный рост темпа стрельбы современных пулеметов делает возможным совпадение числа собственных колебаний пружины с темпом стрельбы. Возникающее при этом явление резонанса может привести к поломке пружины или к расстройству действия автоматики.

Первое (самое низкое) критическое число колебаний винтовой или пластинчатой пружины может быть найдено без всяких затруднений по формуле:

$$T_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{f}},$$

где T_0 — число колебаний в минуту;
g — ускорение силы тяжести;
f — деформация пружины под действием собственного веса и присоединенных к ней деталей.

Собственную массу пружины следует обязательно учитывать путем прибавления к весу соединенной с пружиной детали некоторой части веса пружины. В случае винтовой пружины необходимо прибавлять $\frac{1}{3}$ ее веса, а в случае пластинчатой пружины, закрепленной одним концом, $\frac{33}{140}$ ее веса. В других случаях закрепления пружины коэфициент приведенного веса можно получить общим методом теории колебаний.

Если пружина не соединена ни с какими массами, то число колебаний с вполне достаточной точностью можно определить,

представив пружину невесомой и нагруженной на конце $\frac{1}{3}$ своего веса для винтовой или $\frac{33}{140}$ веса для пластинчатой пружины. Если полученное число колебаний пружины больше темпа стрельбы, то опасности резонанса нет; если же оно меньше, то может потребоваться вычисление второго числа собственных колебаний, для чего необходимы специальные методы.

§ 26. РАСЧЕТ УДЛИНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГИЛЬЗЫ

В стрелковом оружии и малокалиберной артиллерии, где применяются унитарные патроны, гильза имеет назначение:

1) соединять все части патрона;
2) сохранять заряд;
3) плотно закрывать, или обтюрировать, патронник во время выстрела во избежание прорыва пороховых газов.

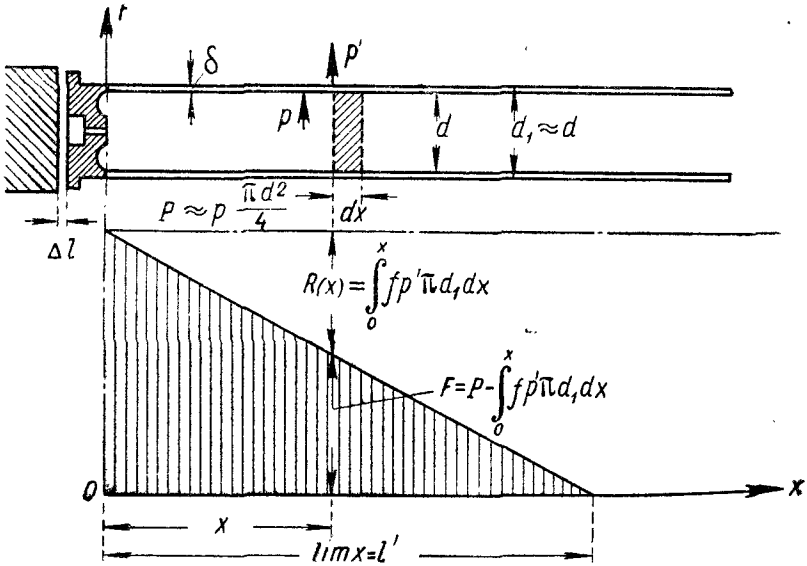


Рис. 58. Схема работы цилиндрической гильзы.

Последнюю роль гильза выполняет благодаря эластичности своих стенок, которые, расширяясь от давления в каморе, прижимаются к поверхности патронника.

Дно гильзы должно упираться в переднюю поверхность затвора, что удерживает короткую гильзу от выбрасывания из патронника, а длинную гильзу при гладком патроннике, кроме того, предохраняет от поперечного разрыва.

Эти соображения указывают на необходимость анализа совместной работы гильзы и затвора.

Ограничиваясь грубым приближением, рассмотрим простейший случай расчета цилиндрической гильзы (рис. 58).

Пусть d — внутренний диаметр гильзы;

δ — малая толщина ее стенок, одинаковая по всей длине;

$d_1 = d + 2\delta$ — внешний диаметр; приближенно $d_1 \approx d$;

p — давление пороховых газов в каморе;

p' — давление, передаваемое гильзой внутренней поверхности патронника; это давление $p' < p$, так как некоторая доля давления p уравновешивается внутренними силами упругости самой гильзы, но приближенно будем считать $p' \approx p$.

Линия OF определяет положение среза пенька ствола, принимаемое за начало координат.

Допустим, что дно гильзы не упирается в переднюю поверхность затвора вследствие образования зазора от неправильного назначения допусков, неблагоприятного их сочетания, износа или неточного изготовления опорных поверхностей запирающих приспособлений.

Образовавшееся при выстреле давление пороховых газов p будет действовать в продольном направлении с силой

$$P = p\frac{\pi d_1^2}{4} \approx p\frac{\pi d^2}{4},$$

стремящейся вытолкнуть гильзу из патронника. Но этому тотчас же начнут противиться силы трения, возникающие на боковых стенках гильзы и распространяющиеся в глубь ствола на все кольцевые элементы, способные перемещаться вследствие скольжения по патроннику.

Выразив элементарную силу трения формулой

$$dR = fp'\pi d_1\, dx,$$

просуммируем эти силы по длине:

$$R(x) = \int_0^x fp'\pi d_1\, dx = fp'\pi d_1 x \approx fp\pi dx. \qquad (161)$$

Выведенный закон линейного нарастания суммарной силы трения изображается верхней областью диаграммы рис. 58.

Сила трения уменьшает действие силы P, создавая равнодействующую

$$F(x) = P - R(x) = p\frac{\pi d^2}{4} - fp\pi dx = p\pi d\left(\frac{d}{4} - fx\right), \qquad (162)$$

изображаемую нижней областью той же диаграммы.

Очевидно, что на некоторой длине $\lim x = l'$ равнодействующая обратится в нуль:

$$F(l') = p\pi d\left(\frac{d}{4} - fl'\right) = 0.$$

Отсюда находим ту предельную длину l', на которой сила трения уравновесит давление пороховых газов на дно гильзы:

$$l' = \frac{d}{4f}. \tag{163}$$

Таким образом, все элементы гильзы, имеющие координаты $x > l'$, останутся ненапряженными и потому не будут подвержены действию силы трения.

При короткой гильзе длиной $l < l'$ сила P не может быть уравновешена силами трения; равнодействующая сила F вытолкнет такую гильзу из патронника на величину зазора, т. е. до упора в затвор.

При длинной гильзе разрывающее усилие $F(x)$, выражаемое формулой (162), вызывает продольное напряжение в сечениях с координатой x:

$$\sigma_x = \frac{F(x)}{\pi d\delta} \approx \frac{p}{\delta}\left(\frac{d}{4} - fx\right). \tag{164}$$

Максимум его будет при $x = 0$, т. е. у дна:

$$\sigma_{max} = \frac{pd}{4\delta} < \sigma_{вр},$$

где $\sigma_{вр}$ — временное сопротивление разрыву.

Если же толщина стенок гильзы будет не одинаковой по всей длине, а убывающей по направлению к дульцу, то максимальное напряжение σ_{max} может сместиться к середине гильзы.

Воспользовавшись формулой (164), находим относительное удлинение кольцевого элемента, абсолютное его удлинение и полное удлинение гильзы, не упирающейся в затвор:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_1} = \frac{p}{E_1\delta}\left(\frac{d}{4} - fx\right); \quad \varepsilon_x dx = \frac{p}{E_1\delta}\left(\frac{d}{4} - fx\right)dx;$$

$$\Delta l = \int_0^{l'} \varepsilon_x dx = \frac{p}{E_1\delta}\left(\frac{d}{4} - f\frac{l'}{2}\right)l' = \frac{1}{8} : \frac{pd^2}{4\delta f E_1} = \frac{1}{8}\sigma_{max}\frac{d}{fE_1}. \tag{165}$$

Для латуни принимают:

$E_1 = 10000$ *кг/мм*^{2} — модуль упругости;

$\sigma_{вр} = 25$ *кг/мм*$^2 = 2500$ *ат* — временное сопротивление разрыву.

При этих данных и $f = 0{,}10$ по формуле (165) получаем ничтожную предельную величину допустимого зазора для латунной гильзы 7,62-*мм* пулемета:

$$\lim \Delta = \Delta l = \frac{1}{8}\,25\,\frac{12}{10^3} = 0{,}038 \text{ } мм.$$

Поэтому-то и рекомендуется у пулемета Максима проверять зазор между пеньком ствола и передней поверхностью

затвора лекалом-шашкой с $e_1 = 1{,}63 \div 1{,}68$ *мм*, что при толщине закраины гильзы, равной $e = 1{,}60$ *мм*, соответствует величине зазора $\Delta = 0{,}03 \div 0{,}08$ *мм*.

Для того же примера по формуле (164) легко установить, что предельная сила, разгружающая затвор благодаря упругости гильзы, при толщине стенок $\delta = 0{,}4$ *мм* должна быть не более

$$F = \sigma_{\max} \pi d \delta = 25\pi \cdot 12 \cdot 0{,}4 = 380 \text{ кг},$$

тогда как наибольшая сила действия пороховых газов

$$P_{\max} = p_{\max} \frac{\pi d_1^2}{4} \approx 3000 \frac{\pi \cdot 1{,}2^2}{4} = 3400 \text{ кг}.$$

Следовательно, затвор воспринимает бóльшую часть донного давления, на которую и следует рассчитывать его прочность с некоторым запасом. Отсюда видно, что при гладкой поверхности патронника в длинной гильзе, не подпертой затвором или не ограничиваемой им в деформациях, произойдет поперечный разрыв.

Но нагруженный затвор сам получает упругую осадку, и, следовательно, деформация гильзы определяется не только возможным геометрическим зазором, а общим перемещением передней поверхности затвора, слагающимся:

1) из деформации запирающих приспособлений, состоящих при сложном устройстве из нескольких рабочих деталей (корпус затвора, упоры, защелки и т. д.):

$$\Delta_1 = \frac{P}{E} \int_A^B \frac{dL}{S}, \qquad (166)$$

где интеграл распространяется на всю длину от передней поверхности затвора A до боевого упора B;

2) из деформации ствольной коробки, растягиваемой на длине от боевого упора B до места крепления ствола C:

$$\Delta_2 = \frac{P}{E} \int_B^C \frac{dL}{S}. \qquad (167)$$

Формулы (166) и (167) показывают, что с увеличением общего перемещения Δ можно бороться конструктивными мерами: уменьшением пути L, по которому происходит передача усилия P, и увеличением площадей поперечных сечений S запирающих приспособлений и ствольной коробки, что, однако, увеличивает вес и габариты системы.

Опасность поперечного разрыва гильзы возрастает в системах со свободным затвором, так же как и при слишком раннем отпирании механически запирающихся затворов. В последнем случае отрицательными факторами являются: а) начавшееся при

высоком давлении смещение затвора, увеличивающее возможную деформацию гильзы; б) отпирание затвора при высоких значениях силы трения, вызывающее износ подвижных частей запирающих органов и увеличение начального геометрического зазора.

Сместить момент отпирания удается довольно просто при помощи „свободного хода" движущихся частей. Таким образом, этот промежуток времени будет использован преимущественно для накопления кинетической энергии, далее расходуемой на работу механизмов перезаряжания.

Предыдущее исследование показывает, сколько неприятностей доставляет длинная гильза при гладком патроннике, между тем как для обтюрации большая длина гильзы совершенно не нужна: для этого было бы достаточно иметь короткую *гильзу-поддон*, которая применяется в крупнокалиберной артиллерии при клиновом затворе.

Идея использования короткой донной части гильзы в качестве обтюрирующего приспособления с выведением из действия сил трения на остальной ее поверхности была представлена в 1929 г. в ручном пулемете системы Ревелли [1]. В нем по поверхности патронника, включая его скат и пульный вход, были сделаны продольные канавки (канавки Ревелли). Проникающие в них пороховые газы компенсируют в значительной степени давление, действующее на внутреннюю поверхность гильзы. Этим устраняются поперечные разрывы гильзы даже при мощном патроне и облегчается экстрактирование гильзы.

§ 27. ЗАТВОРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

Совокупность деталей автоматического оружия, служащих для запирания канала ствола во время выстрела, называется *системой запирания*.

Основная деталь, закрывающая патронник со стороны казенного среза, удерживающая гильзу и воспринимающая давление пороховых газов, передаваемое через дно гильзы, называется *затвором*.

Кроме запирания, затворы выполняют еще следующие функции:

1) принимают участие в перезаряжании оружия, досылая патрон из приемного окна в патронник, а в ряде систем, будучи кинематически связаны с системой подачи, перемещают подающий механизм (Льюис, Бреда, Кольт-Браунинг и др.);

2) несут в себе ударные механизмы для воспламенения капсюля и механизмы для извлечения из патронника стреляных гильз или патронов при разряжании.

В соответствии с условиями работы систем запирания к ним предъявляются следующие основные требования:

---

[1] А. А. Благонравов, Основания проектирования автоматического оружия, изд. Артиллерийской академии РККА, 1934, стр. 249.

1. Детали запирающего механизма должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать давление пороховых газов при выстреле, передаваемое через дно гильзы на затвор, а также резкие удары подвижной системы при отпирании затвора и при подходе ее в крайние положения.

2. Затвор не должен допускать разрыва гильзы, для чего зазор между передней плоскостью затвора и пеньком ствола не должен превосходить определенной величины. Поэтому при конструировании системы запирания следует предусмотреть минимальный износ деталей и возможность устранения зазора.

3. Запирающий механизм должен быть простым по устройству и в изготовлении. Для этого очертания деталей должны быть простейшими и не требовать высокой точности обработки.

4. Детали запирающего механизма должны быть возможно меньших размеров, так как размеры затвора определяют размеры ствольной коробки — одной из наиболее тяжелых деталей оружия; к тому же утяжеление запирающего механизма снижает скорострельность.

5. Затвор должен обеспечивать надежную досылку патронов и вывод стреляных гильз из патронника.

6. Затвор должен быть прочным, так как он воспринимает давление пороховых газов. Для этого прежде всего необходимо обеспечить от смятия опорные поверхности. Принимая допускаемое напряжение на смятие для закаленных поверхностей от 2500 *кг/см*^{2} и выше (см. таблицу 11), определяют необходимую величину опорной поверхности, из которой придется исходить при расчете основных размеров затвора.

Таблица 11

Название оружия	Система автоматики	Допускаемое напряжение на смятие в *кг/см*^{2}
Пулемет Дегтярева	С отводом газов	2 500
» ZB-26	То же	2 900
» Шоша	С длинным ходом ствола	2 500
» SIA	С полусвободным затвором	3 000
Автомат Федорова	С коротким ходом ствола	4 000

Стремясь уменьшить размеры затвора для облегчения веса ручного автоматического оружия и связанной с затвором ствольной коробки, допускают еще бо́льшие напряжения, доводя их до предела, который может выдержать закаленная поверхность соответствующего сорта стали.

Различные детали запирающего механизма, в зависимости от конструкции и условий работы, рассчитывают по соответствующим формулам сопротивления материалов, например: на изгиб совместно со смятием и срезом клина для пулемета Браунинга, на изгиб со смятием боевых упоров для пулемета Дегтярева и т. д.

Следует отметить, что каких-либо норм для допускаемых напряжений не установлено, и при проектировании обычно обращаются к существующим системам, по своей конструкции аналогичным проектируемому образцу.

Обеспечивая достаточную прочность затвора, не следует чрезмерно увеличивать его размеры, так как при этом получаются большие размеры ствольной коробки и всего оружия, повышается вес и уменьшается скорострельность системы.

Минимальный размер поперечного сечения затвора определяется диаметром шляпки гильзы, которую затвор должен перекрывать. Вторым условием, определяющим поперечные размеры затвора, является необходимость размещения в нем ударного и извлекающего приспособлений. Чтобы получить минимальный вес и упростить производство, форму поперечного сечения затвора принимают в виде круга или квадрата, как наиболее выгодную.

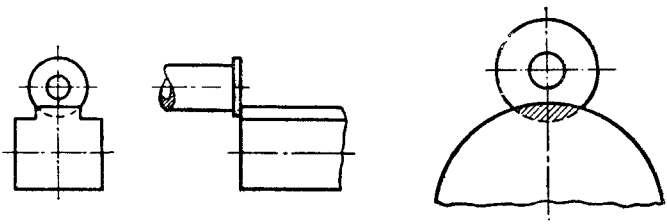


Рис. 59. Досылатель.

Для обеспечения надежного досылания патрона в патронник необходимо, чтобы затвор соприкасался со шляпкой патрона возможно большей поверхностью. Чем бо́льшая часть гильзы захвачена затвором, тем удачнее в этом отношении сконструирован затвор (рис. 59). Исходя из этих соображений, делают выступ-досылатель в той части затвора, которая соприкасается со шляпкой патрона (пулеметы Дегтярева, ZB-26, Шварцлозе и др.).

Для упрощения обработки ствольной коробки досылатель в некоторых конструкциях утоплен в корпус затвора (пулемет МГ-17 и др.).

В конструкции запирающего механизма необходимо предусмотреть возможно малый износ частей. Главнейший вид износа — истирание подвижных частей. Истирание опорных поверхностей ведет к увеличению зазора между передней плоскостью затвора и дном гильзы.

Чтобы избежать сильного истирания опорных поверхностей, отпирание затвора должно происходить после того, как давление в канале ствола достаточно упало; в противном случае опорные поверхности несут большую нагрузку. Во избежание этого конструкцией предусматривается свободный ход подвижной системы: поршня со штоком — в системах с отводом газов; ствола, сцепленного с затвором, — в системах с отдачей ствола.

До начала отпирания затвора проходит некоторый промежуток времени, в течение которого не только пуля, но и значительная часть пороховых газов успевают покинуть канал ствола. Так, например, у пулемета Дегтярева затворная рама до подхода к боевым упорам имеет 11 *мм* свободного хода; у пулеметов Виккерса и ПВ-1 отпирание затвора начинается после 2 — 3 *мм* совместного пути ствола со сцепленным с ним затвором.

Другой способ уменьшения износа деталей затвора заключается в подборе соответствующей стали и ее термообработке. Применяется также дополнительная обработка — хромирование деталей, подверженных сильному износу.

Кроме мер, предупреждающих износ деталей запирающего механизма, при конструировании системы запирания следует предусмотреть возможность регулирования положения затвора в ствольной коробке относительно пенька ствола. Так, в пулеметах Максима и Виккерса положение затвора можно регулировать при помощи шайбы, подкладываемой под гайку шатуна. В пулеметах Кольта-Браунинга и Wzor-36 положение затвора регулируется перемещением ствола в ствольной коробке.

Другой мерой регулирования зазора является замена изнашивающихся деталей. Заменять можно или опорные поверхности ствольной коробки, изготовляемые в виде вкладышей (ZB-26, Шательро и др.), или детали затвора (боевые упоры, клинья).

Сменные опорные поверхности ствольной коробки, кроме устранения влияния износа, позволяют также несколько упростить термическую обработку ствольной коробки.

Истирание происходит не только по поверхности заменяемых упоров или вкладышей, но также и по поверхности затвора и ствольной коробки, соприкасающейся с упором; поэтому запасные части должны быть несколько бо́льших размеров, с учетом величины истирания.

По конструкции и способу запирания затворы подразделяются на следующие виды.

Скользящие затворы:

1. Затворы с клиновым запиранием — пулеметы Браунинга и Бергмана (рис. 60).

2. Запирание перекосом затвора, причем перекос может быть осуществлен:

а) набеганием выступа-сапожка штока — пулемет ZB-26 (рис. 61) и Дарна;

б) набеганием сапожка затвора — пулемет Виккерса-Бертье;

в) шарнирной серьгой — пулеметы Шательро и Гочкиса 1923 г.;

г) осью на ствольной раме, входящей в вырез затвора, — пулемет Кольта (см. рис. 25).

3. Перекос клинового вкладыша — пулеметы Гочкиса 1909 г. и Гочкиса-Арисака.

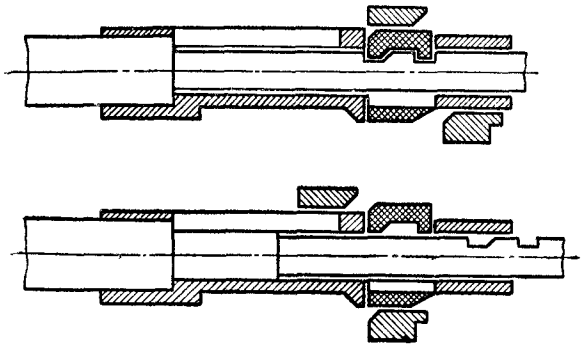


Рис. 60. Затвор Бергмана

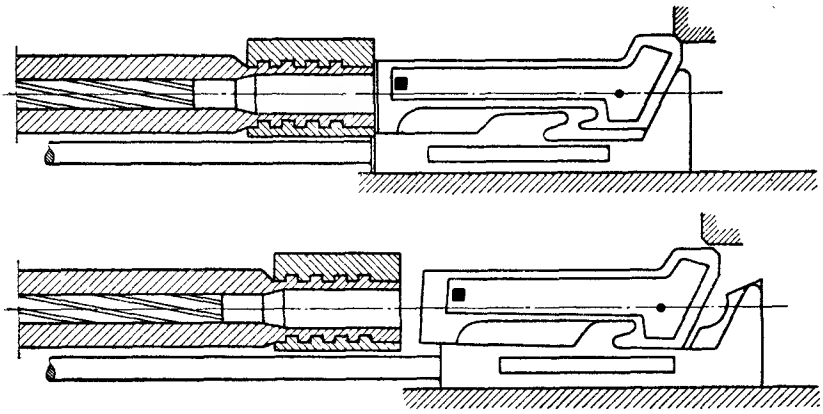


Рис. 61. Затвор ZB-26.

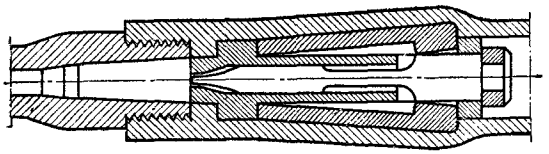


Рис. 62. Затвор ДА.

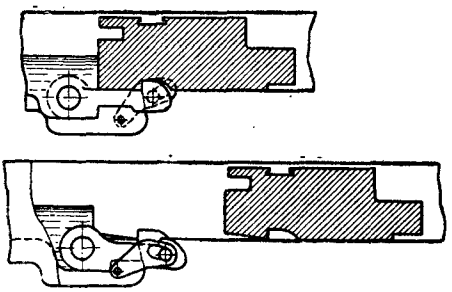


Рис. 63. Затвор Бреда-Сафат.

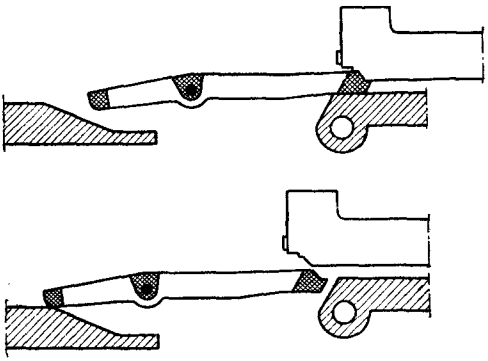


Рис. 64. Затвор Дрейзе.

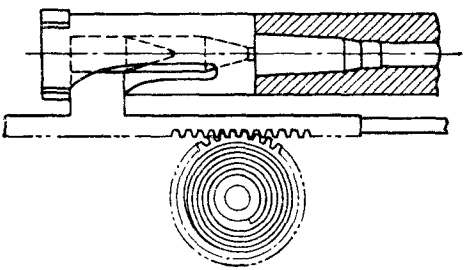


Рис. 65. Затвор Льюиса.

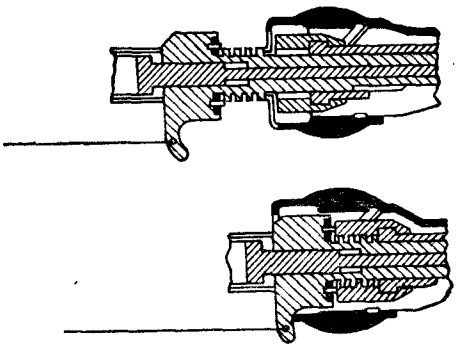


Рис. 66. Затвор МГ-17, МГ-15.

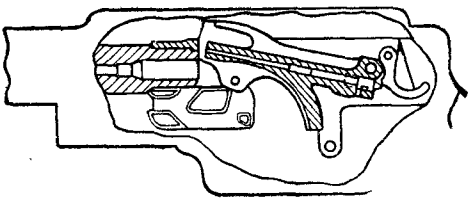


Рис. 67. Затвор Мадсена.

4. Сцепление затвора со ствольной коробкой подвижными защелками:

а) защелками, качающимися в горизонтальной плоскости,— системы Дегтярева (рис. 62), Кьельмана, Маузера;

б) защелками, качающимися в вертикальной плоскости, — автомат Федорова, пулемет Бреда-Сафат (рис. 63).

5. Сцепление затвора со стволом подпиранием затвора рычагом — пулемет Дрейзе (рис. 64), системы Манлихера.

6. Затворы кранового типа — пулемет Гаста (см. рис. 10).

7. Сцепление шарнирно-рычажного типа — пулеметы Максима, Парабеллум, Фуррер.

8. Затворы, сцепляющиеся при повороте:

а) всего затвора — пулемет Льюиса (рис. 65);

б) боевой личинки затвора — пулемет Шоша.

9. Сцепление затвора со стволом вращающейся муфтой — пулеметы Бреда, Гочкиса 1909 г., МГ-17 (рис. 66).

Качающиеся затворы — пулемет Мадсена (рис. 67).

Инерционные затворы — не сцепленные со стволом.

§ 28. ПОДАЧА

Совокупность деталей автоматического оружия, обеспечивающих подачу очередного патрона в патронник, называют *подающим механизмом.*

Самый процесс подачи состоит из двух этапов: движение патрона из магазина в приемник и из приемника в патронник; последний этап называется *досылкой* патрона.

У большинства систем патрон досылается затвором. В автоматических системах Мадсена патроны досылаются специальной деталью — *досылателем.*

Пространство, в котором помещается очередной патрон перед подачей в патронник, называется *приемником.* Основное назначение приемника — установка патрона в строго определенное положение, с таким расчетом, чтобы затвор при своем движении захватил патрон и дослал его в патронник.

Практика показывает, что большинство задержек в работе автоматического оружия происходит вследствие неисправной работы механизмов подачи, которые представляют собой наиболее ответственную часть автоматики, наиболее капризную в работе и трудную в проектировании и отладке оружия. Причиной задержек является то, что подающий механизм, перемещая очередной патрон из магазина в приемник, выполняет наиболее сложную часть работы автоматического оружия.

Для того чтобы автоматическое оружие надежно работало, подающий механизм должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Своевременно подавать очередной патрон, т. е. очередной патрон должен быть в приемнике к тому моменту, когда затвор, досылающий его в патронник, окажется в положении, соответствующем досылке патрона. Это условие необходимо при системе подачи, не связанной с движением затвора.

2. Застопоривать патрон в приемнике, т. е. придавать ему строго определенное положение; в противном случае затвор не всегда сможет извлечь патрон из приемника.

3. Путь движения патрона из приемника в патронник должен быть строго определенным, устраняющим возможность утыкания или перекос патрона.

4. Подающий механизм должен работать независимо от положения оружия. Из этих соображений движение патрона на всем пути должно быть принудительным, и рассчитывать на движение патрона, хотя бы на незначительном участке пути, только под действием силы тяжести не следует.

5. Подающий механизм должен быть малочувствительным к неточностям обработки деталей, к их износу, загрязнению и пр.

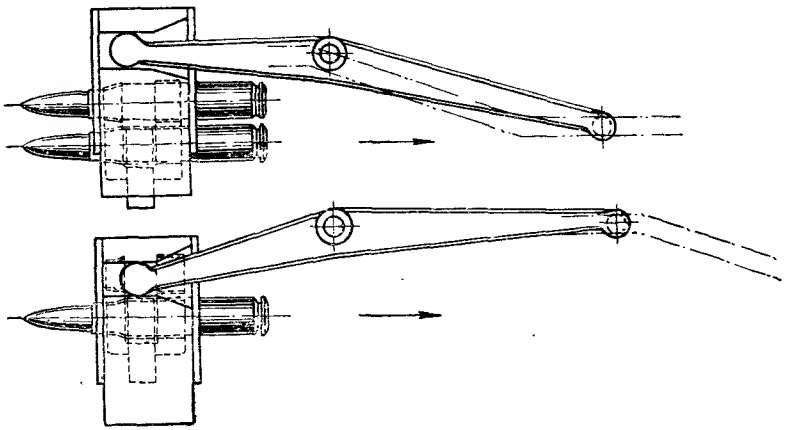


Рис. 65. Подача Кольта-Браунинга.

Проектируя систему, необходимо тщательно исследовать вопрос о влиянии допусков на детали механизма подачи, которые, при неблагоприятном их сочетании, могут резко изменить закон движения на начальном этапе работы подвижной системы.

6. Конструкция подающего механизма должна исключать толчки и удары при работе, так как при резком движении, например в момент извлечения патрона из ленты или при продольном перемещении ленты, возможно выдергивание или выламывание пули из дульца гильзы. Примером рациональной конструкции, обеспечивающей плавную подачу, служит система Кольта-Браунинга (рис. 68).

7. Досылаемый патрон не должен упираться пулей в направляющую поверхность, так как при недостаточно прочном креплении пули в дульце возможно ее выламывание. Особенно это недопустимо при стрельбе специальными пулями — зажигательными, разрывными и пр.

8. Для приведения в действие подающего механизма затрачивается некоторая часть энергии подвижной системы; поэтому необ-

ходимо добиваться уменьшения расхода энергии подвижной системы на подачу, от чего зависит скорострельность оружия.

9. Конструкция подающего механизма должна предусматривать возможность быстрого устранения всех задержек при стрельбе.

10. Подающий механизм авиационного оружия должен предусматривать подачу ленты с обеих сторон; особенно это необходимо при неподвижных установках.

11. Детали подающего механизма должны обладать достаточной прочностью и быть простыми в производстве.

Как указывалось выше, работа механизмов подачи требует большой затраты энергии. Эта энергия передается или от подвижной системы автоматики (ствола, штока или затвора) или берется от постороннего источника, для чего применяются главным образом пружины магазинов, взводимые при снаряжении последних патронами. В авиационных пулеметах для этого может быть использована энергия авиадвигателя. Известен ряд авиационных механизированных пулеметов: Сименса, Шамбона (Chambon), Лариба (Larib), ZB-80 и др.

Таким образом, механизмы подачи можно подразделить на два вида:

1) с подачей за счет кинетической энергии подвижной системы;

2) с подачей за счет посторонней энергии.

Необходимость затратить работу движущихся частей на подачу патронов ставит скорострельность оружия в известную зависимость от конструктивного выполнения подачи.

Элементы конструкции подачи следующие:

а) магазин для размещения патронов в определенном порядке;

б) приспособления, транспортирующие патроны в патронник;

в) досылатель, представляющий собой часть затвора.

Ленту можно считать также видом магазина: выполняя функции магазина, она одновременно является и звеном транспортирующего механизма.

В зависимости от вида подачи изменяются конструкция оружия и условия работы с ним. Этот вопрос детально разобран в следующем параграфе. Здесь же рассмотрим основные конструктивные виды подачи:

а) подачу из коробчатого магазина;

б) подачу из дискового магазина;

в) ленточную подачу.

А. ПОДАЧА ИЗ КОРОБЧАТОГО МАГАЗИНА

Подача этого вида осуществляется за счет энергии сжатой при снаряжении магазина пружины. Такая система применяется в пистолетах, самозарядных винтовках, ручных пулеметах и автоматических пушках (больших калибров).

Патроны в магазине располагаются или в один ряд друг за другом или в шахматном порядке.

По внешнему виду магазин представляет собой кольцевой сектор. Такую форму обусловливает конусность гильзы: чем больше конусность, тем больше крутизна коробки магазина.

В случае применения патронов с закраиной необходимо предусмотреть, чтобы патроны не сцеплялись между собой. Наилучшей мерой против сцепления патронов в магазине служит подбор соответствующего радиуса кривизны коробки магазина (рис. 69).

Пружины коробчатых магазинов делаются главным образом ленточными, из нескольких ветвей. Сила пружины должна быть достаточной, чтобы преодолеть вес патронов, подавателя и трение, возникающее при перемещении патронов, и обеспечивать своевременность подачи очередного патрона в патронник.

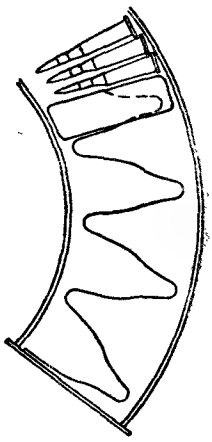


Рис. 69. Коробчатый магазин.

Направляющими при досылке патрона обычно служат загнутые верхние края стенок магазина. Загибы конструируются в соответствии с необходимостью удерживать патроны в магазине; этим определяется расстояние по ширине между загибами. Длина загибов достаточна, если корпус гильзы перекрывается ими несколько далее расположения центра тяжести патрона, считая от дна гильзы.

К недостаткам коробчатых магазинов следует отнести сравнительно малую прочность, возможность смятия коробки, что влечет неисправность работы оружия. При увеличении же прочности коробок получается большой „мертвый" вес.

В авиационном оружии коробчатые магазины не применяются вследствие очень малой их емкости, за исключением авиационных пушек крупных калибров.

Б. ПОДАЧА ИЗ ДИСКОВОГО МАГАЗИНА

Подача из дискового магазина осуществляется двумя способами:

1) за счет энергии подвижной системы, поворачивающей весь диск с патронами (пулеметы Льюиса и Виккерса F);

2) за счет энергии предварительно взведенной пружины, перемещающей патроны внутри магазина (пулеметы ДА, Wzor-37, Шательро и др.).

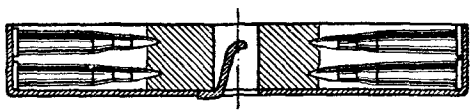


Рис. 70. Дисковый магазин.

Следует различать магазины однорядные и многорядные.

В авиационных пулеметах применяются многорядные магазины, как более емкие. Пружины дисковых магазинов — спиральные. При конструировании магазина необходимо проверить

пружину на своевременную подачу очередного патрона в приемник при первом и при последнем патроне в магазине.

Дисковые магазины (рис. 70) — несколько большей емкости, чем коробчатые,—все же недостаточно емкие.

Дальнейшее развитие дисковых магазинов представляют собой барабанные одно- и двусторонние магазины, емкость и прочность которых больше, чем описанных выше систем (магазины для МГ-15 и пушки „Эрликон").

Дисковые и барабанные магазины применяются в авиационных, танковых и ручных пулеметах; в ручных — предпочтительно дисковые.

В. ЛЕНТОЧНАЯ ПОДАЧА

В автоматическом оружии наиболее распространена ленточная подача патронов. При такой подаче патроны соединены друг с другом лентой, которой сообщается поступательное движение так, что после каждого выстрела она продвигается на промежуток, равный расстоянию между осями двух соседних патронов. Это расстояние называется *шагом подачи*.

Такой вид подачи дает возможность значительно увеличить емкость магазина при относительно небольших размерах самого оружия и при небольшом „мертвом" весе, приходящемся на один патрон.

Ленты, применяемые для подачи, бывают следующих видов:

Мягкие, изготовляемые из холста или хлопчатобумажной ткани, например ленты для пулеметов Максима, Кольта, Шварцлозе и др. Мягкие ленты имеют незначительный вес, хорошую гибкость и прочность. Однако они сравнительно быстро изнашиваются и гигроскопичны, вследствие чего в зависимости от метеорологических условий изменяются усилия извлечения гильзы из ленты и шаг ленты.

Металлические полужесткие, представляющие собой ленту из отдельных звеньев, шарнирной осью которых являются патроны. После извлечения патрона из ленты звено освобождается и направляется по звеньеотводу наружу или в специальный звеньеуловитель.

Полужесткие ленты могут быть и с неразъемными звеньями, соединяемыми между собой специальными шарнирами.

Полужесткие ленты прочны, негигроскопичны, следовательно, шаг их не изменяется. Срок службы их больше, чем мягких лент.

Недостатком их является относительно большой „мертвый" вес, получающийся при достижении необходимой прочности и гибкости.

Особые требования к гибкости ленты предъявляются в оружии, предназначенном для подвижных установок, в которых патронные ящики для рационального размещения приходится вписывать в радиус турели (рис. 71 и 72).

В зависимости от шага подачи и места размещения звена по высоте гильзы изменяются размеры и толщина звена при

сравнительно одинаковых балистических и конструктивных данных оружия.

Жесткие ленты представляют собой металлическую полосу с выштампованными в ней или же приклепанными держателями для патронов. Подобного типа лента применяется в автоматических системах Гочкиса.

Емкость таких лент обычно 15—30 патронов. Достоинства их заключаются в удобстве обслуживания оружия и простоте изготовления; недостаток — малая емкость. Для увеличения емкости ленты соединяют друг с другом шарнирно, а для большей гибкости емкость отдельного участка уменьшают до 3 — 5 патронов.

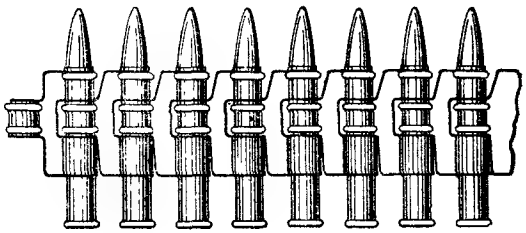


Рис. 71. Звенья ПВ-1.

По способу извлечения патронов из ленты различают два вида ленточной подачи:

1. Ленты с кольцевыми гнездами (пулеметы Виккерса, Бреда, Кольта-Браунинга), с извлечением патронов назад. В этом случае движение патрона совершается последовательно в двух плоскостях: извлеченный из ленты патрон должен быть перемещен на высоту оси канала ствола, а затем уже направлен вперед, в патронник (двухэтажная подача; рис. 73).

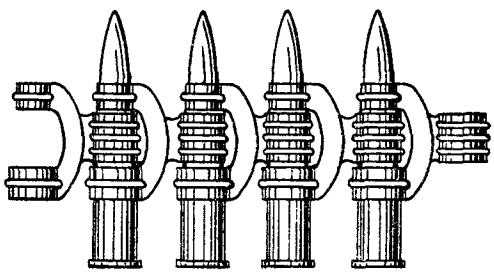


Рис. 72. Звенья повышенной гибкости.

2. Ленты с пружинящими незамкнутыми гнездами (пулеметы МГ-17, Гочкиса, пушка „Эрликон"). При этой подаче патрон из ленты может быть сразу дослан в патронник (одноэтажная подача).

По способу приведения ленты в движение различают два основных типа подачи:

1) продвижение ленты вращающимся барабаном (зубчаткой);

2) продвижение ленты ползуном, имеющим поступательное движение.

Устройство подачи определяется конструкцией автоматики, в частности системой запирания.

Ленточная подача осуществляется за счет энергии подвижной системы. Так как на подачу расходуется относительно большое количество энергии, то для того, чтобы получить возможно больший темп стрельбы, необходимо стремиться к рациональному использованию этой энергии. Из этих сообра-

жений подавать ленту выгоднее в период движения системы *вперед*, т. е. *при накате подвижных частей автоматики.*

В самом деле, для работы автоматики некоторые части системы сначала приводятся в движение, после чего они проходят определенный путь туда и обратно, преодолевая на различных участках пути сопротивления подающего механизма и прочих механизмов вспомогательного назначения. Очевидно, чем позже будут включаться какие бы то ни было виды сопротивлений, тем с бо́льшими скоростями эти части будут проходить все предыдущие участки пути. Следовательно, тем скорее будет пройден заданный путь.

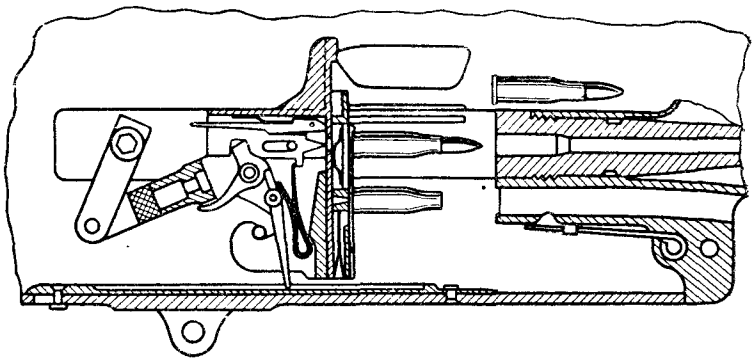


Рис. 73. Подача ПВ-1.

Этот общий принцип легко доказать на простейшем примере. Пусть требуется построить диаграммы движения частей автоматики в трех вариантах при следующих данных:

масса подвижных частей . . . . . $M = 0{,}0870$ *кг сек*^{2}/*м*
длина отката . . . . . $l = 0{,}100$ *м*
начальное поджатие возвратной пружины . . $F_1 = 8$ *кг*
жесткость пружины . . . . . $k = 80$ *кг/м*
сопротивление механизмов вспомогательного назначения на всем пути отката и наката . $R = 3$ *кг*
сопротивление механизмов подачи . . . . . $H = 6$ „
начальная скорость отката . . . . . $u_0 = 7$ *м/сек*

Расчет выполним для трех случаев (рис. 74):

а — подача происходит полностью на первом этапе движения частей автоматики, т. е. при откате системы назад;

б — подача распределяется равномерно на первый и второй этапы движения;

в — подача осуществляется на втором этапе во время возвратного движения частей, т. е. вперед.

Эти случаи показаны на рис. 74 путевой диаграммой, более удобной, чем временны́е диаграммы, при сравнительном анализе движений.

На диаграмме действующие силы представлены прямыми наклонными линиями: пунктиром — усилие возвратной пружины;

сплошной линией — суммарное действие возвратной пружины и сопротивлений механизмов вспомогательного назначения; пунктиром с точкой — то же, но с добавлением половины сопротивления подающих механизмов; пунктиром с двумя точками — то же, но с добавлением полного сопротивления механизмов подачи.

Скорострельность определяется временем совершения полного цикла движения, который складывается из времен: t_1 — отката и t_2 — наката:

$$T = t_1 + t_2 = \int_0^l \frac{dx}{u} + \int_l^0 \frac{dz}{v}.$$

Поэтому очевидно, что время T будет наибольшим в случае $а$ — подачи на первом этапе, и наименьшим в случае $в$ — подачи на втором этапе, так как в первом случае в знаменателе скорости u и v имеют меньшие значения, чем во втором.

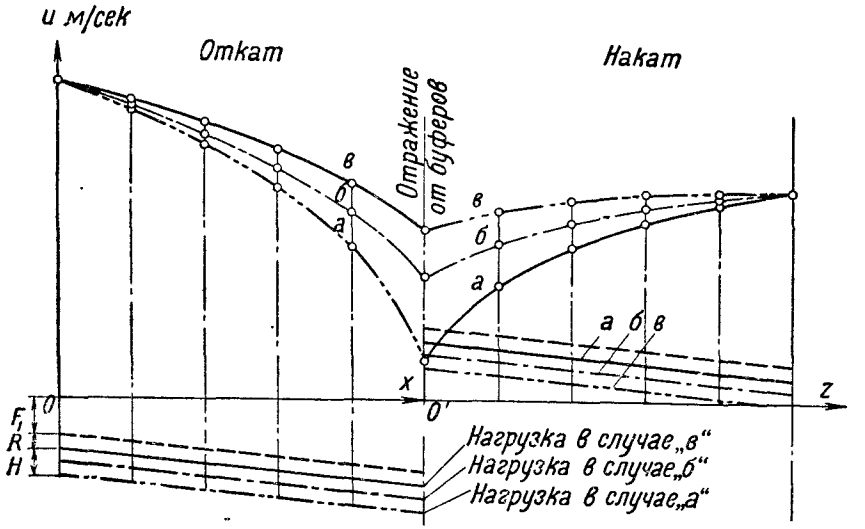


Рис. 74. Диаграмма отката и наката: участок F_1 — усилие возвратной пружины.

Изменение энергии при этом происходит следующим образом:

1. В начале отката энергия равна E_0.

2. В процессе отката кинетическая энергия изменяется в результате перехода ее в потенциальную энергию сжатия возвратной пружины E_f и производства работ механизмами вспомогательного значения T_R и подачи T_H:

$$-\int_0^x d\,(E_f + T_R + T_H).$$

3. В процессе наката кинетическая энергия изменяется вследствие освобождения потенциальной энергии сжатия возвратной пружины и производства работ:

$$\int_{l}^{0} d\,(E_f - T_R - T_H).$$

4. Энергия в конце наката равна: $E_0 - T_R - T_H$. Система начинает движение с энергией E_0 и возвращается к пеньку ствола с конечной энергией $E_0 - T_R - T_H$, одинаковой во всех трех случаях.

Ясно, что при осуществлении заданной скорострельности в случае *в* можно сообщать системе не столь высокую начальную скорость, как в случае *а*, и система будет менее напряжена при пуске в ход.

Указанный общий принцип представляет выгоды, особенно при автоматической стрельбе очередью, благодаря устройству в затыльнике буферов, отражающих движение в обратном направлении без значительных потерь, т. е. с сохранением кинетической энергии удара подвижных частей при откате. Однако применение его может иметь и свои отрицательные стороны.

Во-первых, необходимо проверить, обеспечивается ли работа подающих органов действием только одной возвратной пружины при одиночных выстрелах.

Во-вторых, надо предусмотреть некоторый запас потенциальной энергии пружины во избежание задержек, могущих произойти от непредвиденных обстоятельств (загрязнение пулемета, перекосы и т. д.) и наблюдающихся на практике. Вследствие этого и усилие, передаваемое на шептало, а также усилие при перезаряжании в этих системах должно быть бо́льшим.

Для большинства систем этот запас энергии предпочтительнее иметь на первом этапе движения, чтобы обеспечить нормальную работу пулемета на полном откате. Избыток же энергии поглощается специальными амортизаторами затыльника. Тогда возвратной пружине остается лишь дослать части в переднее положение при сравнительно умеренной скорости, и удар затвора о пенек ствола становится менее опасным.

С другой стороны, осуществление подачи на первом этапе, т. е. при сравнительно высоких скоростях, приводит к резким толчкам, выдергиванию пули, выпадению капсюля и тому подобным задержкам.

Конструктор должен проанализировать все возможности и сделать правильный выбор конструкции. Здесь нельзя дать готовых рецептов ввиду большого разнообразия тактико-технических требований на проектируемое оружие.

Использование энергии подвижной системы на первом этапе работы автоматики при ленточной подаче в большинстве случаев возможно только тогда, когда применяются ленты

с незамкнутыми пружинными звеньями. При ленте с замкнутыми звеньями патрон должен извлекаться во время перемещения подвижной системы назад. В этот период нельзя перемещать ленту или же нужно чрезмерно удлинять ход системы. Поэтому при данном типе ленты неизбежно перемещение ее в период возвратного движения.

Для облегчения работы подвижной системы при ее движении вперед у некоторых систем автоматического оружия в подающий механизм включаются отдельные пружины, аккумулирующие энергию при движении системы назад; при движении системы вперед пружина возвращает накопленную энергию системе подачи — пулеметы Бергмана (рис. 75) и Виккерс F.

Рассмотрим условия работы механизма при ленточной системе, независимо от его типа (барабан или ползун).

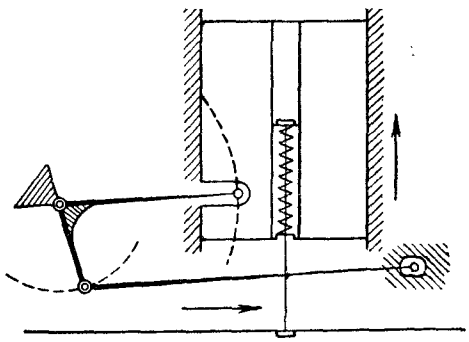


Рис. 75. Подача Бергмана.

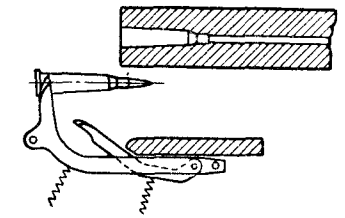
В системах с отдачей ствола работа механизма может быть связана или с движением ствола или с движением затвора; в остальных системах — с движением затвора. В последнем случае, как уже отмечалось, отпадает надобность в своевременности подачи патрона в приемник к моменту досылки патрона.

При связи механизма подачи с движением ствола получается несомненная выгода в том отношении, что у ствола отнимается значительная часть энергии его движения; кроме того, не перегружается затвор, но зато при этом устройстве отладка системы значительно затруднена.

Необходимо тщательно согласовывать движения ствола и затвора, обеспечивая своевременность подачи. В одинаковой степени запаздывание подачи и ее преждевременность будут мешать правильной работе системы, вызывая заклинивание, утыкание и пр. Это особенно имеет значение в авиационном оружии, из которого приходится стрелять под различными углами возвышения и склонения: при независимом перемещении ствола и затвора координация их движений будет меняться при изменении углов стрельбы.

При проектировании системы подающего механизма, независимо от его вида, нужно учитывать длину хода подвижной системы, так как от величины хода зависит ее скорострельность. Чем больше расстояние от оси ствола до патрона в начале его досылки в патронник, тем больше должна быть длина хода затвора, так как патрон, толкаемый затвором, должен, кроме движения вперед, приближаться в поперечном направлении к оси затвора. Естественно, что при большом расстоянии от патрона до оси затвору необходимо дать больший отход назад (см. рис. 73).

Если приемник, по конструктивным условиям, расположен на достаточно большом расстоянии от оси канала ствола, то при необходимости уменьшить длину хода затвора нужно делать специальные механизмы, быстро переносящие патрон из приемника к затвору и приближающие его к оси канала.



Примером подобного устройства служит подающий рычаг пулемета Дарна (рис. 76).

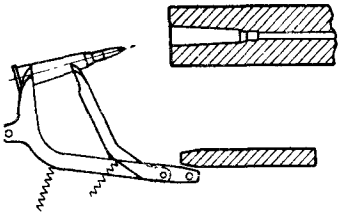


Рис. 76. Подаватель Дарна.

§ 29. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ АВИАЦИОННЫХ ПУЛЕМЕТОВ НА СИСТЕМУ ПОДАЧИ

Из специфических условий работы авиационных пулеметов вытекают и некоторые специальные требования, предъявляемые к работе подающих механизмов стрелкового оружия, установленного на самолетах:

1) высокий темп стрельбы;
2) большая надежность и безотказность в работе;
3) быстрое устранение возможных задержек;
4) размещение оружия, не стесняющее работу экипажа и минимально отражающееся на аэродинамических качествах самолета;
5) возможность подвода питания с правой и левой сторон оружия.

Все эти требования еще больше осложняют задачу рационального устройства подающих механизмов, конструкция которых бывает двух описанных ниже типов.

А. МАГАЗИННАЯ ПОДАЧА

Какова бы ни была конструкция магазинов (коробчатая, дисковая), основным недостатком их являются малая емкость и большой „мертвый“ вес. При высокой скорострельности современных авиационных пулеметов требуется частая смена магазинов, что вызывает перерывы в стрельбе.

Магазин должен быть установлен на самом оружии, а это и является основной причиной ограничения емкости, так как при большой емкости габариты магазина плохо согласуются с возможностью установки оружия в стесненных условиях на самолете.

Второй причиной ограничения емкости магазина является то, что при магазинном питании подача обычно осуществляется пружиной. Для перемещения значительного количества патронов в короткие сроки потребуется мощная пружина. Необходимая мощность пружины возрастает с увеличением темпа стрельбы, с которым должна быть согласована скорость подачи.

В тех случаях, когда подача патронов из магазина осуществляется за счет энергии подвижной системы, емкость магазина ограничена, так как чрезмерно массивный магазин требует большой затраты энергии.

Возможно конструирование комбинированной магазинной подачи, в которой при каждом цикле автоматики взводится пружина, подающая патроны. Это позволит увеличить габариты магазина и обеспечит надежную подачу патронов.

Известна попытка осуществления питания при помощи системы магазинов, из которых один, связанный с подвижной системой, питает непосредственно оружие, а следующий пополняет первый магазин (работает за счет энергии пружины). Однако конструктивное оформление подобной системы довольно громоздко, особенно при подвижных установках.

Рассмотрев конструкции магазинной подачи, можно сделать следующие выводы:

1. Магазины малой емкости неприменимы при неподвижных установках, так как доступ к ним в полете неудобен, а в большинстве случаев и невозможен.

2. Питание из магазинов малой емкости применимо в подвижных установках, когда магазин быстро и легко снимается с оружия и может быть удобно расположен в непосредственной близости от стрелка.

3. В случае применения пулеметов с магазинным питанием весьма упрощается устройство турели и возможны большие угловые скорости перемещения оружия, что весьма важно в условиях скоротечного воздушного боя.

4. Система эта представляет неудобство в том отношении, что опорожнение магазина малой емкости может произойти в решительный момент боя, и потеря даже минимального времени на смену магазина может губительно отразиться на исходе боя.

5. Магазины большой емкости — свыше 250 патронов нормального калибра и свыше 60 пушечных — можно применять в неподвижных установках, если их габариты вписываются в контуры самолета.

6. Применение магазинов большой емкости при подвижных установках затрудняет управление оружием, значительно смещает центр тяжести оружия по мере израсходования боеприпасов, ухудшает аэродинамику самолета (при неэкранированных установках).

Все это говорит в пользу непрерывного питания, но тем не менее за магазинным питанием остаются следующие преимущества: уменьшение влияния различных вредных факторов на работу оружия — тряска, вибрации, ускорения при эволюциях самолета — и уменьшение числа задержек из-за захлестывания ленты. Кроме того, при магазинном питании отпадает надобность в системах подвода ленты и звеньеотводах и сама конструкция оружия крайне упрощается. Все перечисленное обеспечивает бо́льшую надежность оружия.

Б. ЛЕНТОЧНАЯ ПОДАЧА

Ленточный способ питания очень универсален, так как может применяться в различных образцах оружия при подвижных и неподвижных установках.

Следует отметить, что конструкции подвижных установок иногда бывают довольно сложными в целях обеспечения безотказной работы оружия.

При питании лентой возможно вести продолжительную стрельбу до израсходования всего запаса без перезаряжания оружия (конечно, при отсутствии задержек).

По сравнению с магазинным питанием подача лентой позволяет значительно повысить возимый комплект патронов стрелка, так как число патронов при этом определяется емкостью патронных ящиков, располагаемых отдельно от оружия.

Расстояние, на которое могут быть удалены патронные ящики от установки оружия, ограничивается длиной участка ленты, который может перемещаться за счет энергии подвижной системы, не нарушая ее правильной работы.

Отнесение патронных ящиков от оружия требует устройства путей, по которым лента должна иметь вполне определенное движение, чтобы ввод ее в оружие обеспечивал правильную его работу. Конструктивно эта часть системы подачи осуществляется при помощи подающих (питающих) рукавов — жестких или гибких. При этом возникают добавочные силы трения, отрицательно влияющие на работу оружия.

При подвижных установках эти затруднения сказываются в большей степени, так как оружие меняет свое положение относительно патронного ящика. Ввиду этого к самой ленте предъявляются требования достаточной гибкости в различных направлениях по отношению к подающим рукавам. Конструкция рукавов должна обеспечивать правильную подачу патронов при любом угле возвышения и склонения оружия и при любом направлении его оси относительно патронных ящиков.

Материал подающих рукавов должен обеспечивать достаточную прочность, малый вес и малое трение при прохождении ленты по рукаву.

Лента авиационных пулеметов, помимо прочности и достаточной гибкости во всех направлениях, должна удовлетворять еще ряду требований, обеспечивающих безотказность работы оружия. К таким требованиям относятся: независимость работы ленты от температуры, влажности воздуха и износа самой ленты.

Как известно, вследствие этого в авиации пришлось отказаться от применения матерчатых лент, имеющих широкое и вполне оправданное практикой применение в наземных пулеметах.

Применению матерчатых лент препятствует также необходимость специального приспособления, убирающего освобожденную часть ленты.

К числу отрицательных сторон ленточной подачи относится влияние ее на работу автоматики. Ленточные системы автоматического оружия снижают темп стрельбы в зависимости от конструкции подающего механизма, расположения подающих рукавов, расстояния до патронных ящиков и числа патронов в свисающей части ленты.

Необходимость обеспечения гибкости ленты приводит к противоречивым влияниям конструкции ленты на надежность работы системы. Чем более гибка и подвижна лента, тем больше на нее воздействуют всякого рода толчки, вибрации и перемещения в патронном ящике, что нередко служит источником задержек в стрельбе.

Наконец, при ленточной подаче требуется устройство звеньеотводов.

Все перечисленное показывает сложность решения задачи непрерывного питания авиационного оружия и требует тщательного анализа условий работы оружия и установки для обеспечения надежной работы системы подачи. Особенно усложняются вопросы подачи с увеличением калибра оружия; при этом прежде всего растет вес магазинов и патронных ящиков. Во избежание чрезмерного увеличения веса емкость магазинов приходится ограничивать; в противном случае потребуются большие усилия при смене магазина.

В системах с ленточным питанием все перечисленные выше затруднения увеличиваются, и практика подтверждает, что чем больше калибр оружия, тем при меньшем количестве патронов в ленте оружие способно бесперебойно работать.

Поэтому с укрупнением калибра система магазинного питания если и не предпочтительнее ленточной, то, во всяком случае, может конкурировать с нею.

§ 30. ВЫБРАСЫВАЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ

Механизмы, обеспечивающие удаление из патронника стреляной гильзы или патрона при разряжании, называются *выбрасывающими* (экстрактирующими).

Условия работы выбрасывающего механизма зависят прежде всего от усилия, необходимого для извлечения гильзы из патронника. Это усилие может резко изменяться в зависимости от конструкции автоматики.

В системах с длинным ходом ствола извлечение гильзы из патронника происходит тогда, когда пороховые газы не оказывают влияния на гильзу: промежуток времени от начала выстрела до начала извлечения гильзы настолько велик, что давление пороховых газов в канале ствола успевает снизиться до атмосферного.

Опыты показывают, что усилие, необходимое для извлечения латунной гильзы, спустя некоторый промежуток времени после выстрела имеет величину от 0 до 11 *кг*. Затруднение при экстрактировании объясняется тем, что, ввиду остаточной

деформации гильзы, она несколько заклинивается в патроннике. Величина деформации зависит от допусков в изготовлении гильзы по диаметру и толщине стенок, а также от условий термической обработки гильзы.

Кроме того, ухудшение экстрактирования наблюдается при плохой обработке поверхности патронника и его загрязнении.

В автоматическом оружии со свободным затвором, с коротким ходом ствола, двигающегося вперед, с отводом пороховых газов, извлечение гильзы происходит еще при наличии некоторого давления пороховых газов внутри гильзы.

Опыты показывают, что при стрельбе с вынутым выбрасывателем из большинства систем оружия, работающих на принципе отвода пороховых газов или с коротким ходом ствола, гильза, в особенности смазанная, выбрасывается из патронника сама остаточным давлением пороховых газов.

В оружии, работающем по принципу отдачи затвора, гильза извлекается из патронника при наличии высокого давления пороховых газов в канале ствола. Следовательно, условия экстрактирования гильзы для данного вида автоматики, обеспечивающие надежную работу системы, имеют особо важное значение, так как при этом сильное давление внутри гильзы может привести к ее поперечным разрывам.

В некоторых системах с отдачей затвора (пушка „Эрликон"; рис. 77) во избежание задержек при возможных поперечных разрывах гильз в случае применения мощных патронов введено приспособление, удерживающее всю подвижную систему в крайнем заднем положении при наличии в патроннике оборвавшейся части гильзы.

Выбрасывание гильзы из патронника остаточным давлением пороховых газов без применения специального выбрасывателя использовано в ряде образцов автоматического оружия, работающего по принципу свободного затвора при маломощном патроне — пистолетном или малокалиберном (пистолет Сент-Этьен, автоматическая винтовка Экдаль, пулемет Блюм).

В системах с полусвободным затвором для обеспечения надежного экстрактирования применяется смазывание патронов, для чего служат масленки, из которых автоматически поступает масло на патрон при подаче его в патронник.

Конструкция выбрасывающих механизмов определяется устройством затвора. При затворе, движущемся поступательно, выбрасыватель представляет собой зацеп, заходящий в желобок или за закраину гильзы; зацеп расположен в передней части затвора.

При качающемся затворе выбрасыватель располагают в казенной части ствола. Выбрасыватель представляет собой рычаг, поворачивающийся на оси от толчка, сообщаемого ему при открывании затвора (рис. 78).

В ряде систем автоматического оружия: Максим, Бреда, Парабеллум, Кольт-Браунинг и др., в качестве выбрасывателя служат лапки затвора (см. рис. 73 и 79). Эта конструкция

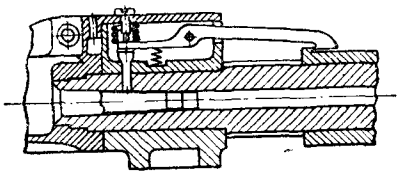


Рис. 77. Предохранитель пушки „Эрликон".

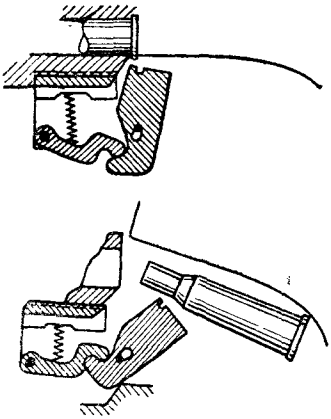


Рис. 78. Выбрасыватель Мадсена.

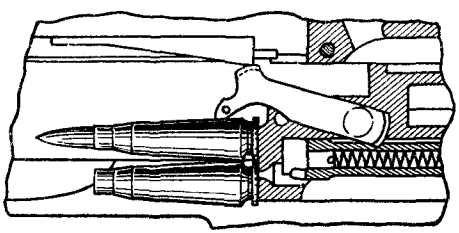


Рис. 79. Выбрасывание очередным патроном.

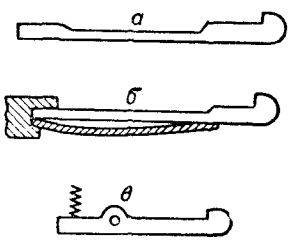


Рис. 80. Три схемы выбрасывателей.

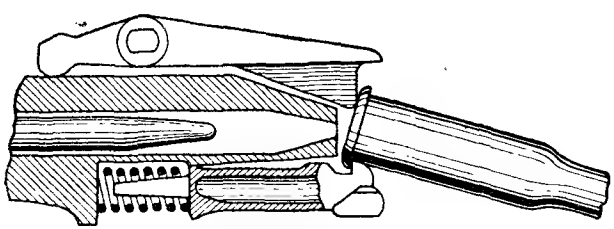


Рис. 81. Выбрасыватель Гочкиса.

определяется системой подающего механизма; она обеспечивает весьма надежное извлечение гильз и патронов из патронника.

Для надежного захвата гильзы зацеп выбрасывателя очерчивается по дуге окружности, соответствующей окружности корпуса гильзы. Передняя поверхность зацепа делается скошенной для того, чтобы при досылке патрона в патронник зацеп мог перескочить через шляпку или закраину патрона (рис. 80).

При поступательном движении затвора гильза, захваченная выбрасывателем, движется с затвором, пока не встретится с отражателем, удаляющим гильзу за пределы оружия. Это определяет другую функцию выбрасывателя — надежно удерживать (фиксировать) гильзу в затворе на соответствующем участке пути.

Для фиксирования гильзы в затворе, для перескакивания зацепа через закраину патрона и для совместной его работы с отражателем конструкция выбрасывателя может быть выполнена следующим образом:

а) выбрасыватель сам является пластинчатой пружиной (рис. 80, *а*);

б) наружная поверхность выбрасывателя опирается на пластинчатую пружину (рис. 80, *б*);

в) выбрасыватель закреплен на оси; на одно из его плеч действует винтовая пружина, расположенная перпендикулярно к оси затвора (рис. 80, *в*);

г) на выбрасыватель действует винтовая пружина, расположенная параллельно оси затвора (рис. 81).

Если выбрасывателем служат лапки затвора, то патрон фиксируется при помощи специальных деталей.

Для удаления гильзы, извлеченной из патронника, за пределы оружия служит *отражатель*. Он представляет собой выступ, штырь или рычаг, укрепленный в неподвижной части оружия и проходящий через прорезь затвора. На этот выступ, расположенный диаметрально по отношению к выбрасывателю, набегает гильза. Реакция отражателя вместе с реакцией выбрасывателя создает пару сил, вращающую гильзу в сторону расположения выбрасывателя (см. рис. 81). С этой стороны должно быть расположено выводное окно ствольной коробки, через которое удаляется гильза или патрон.

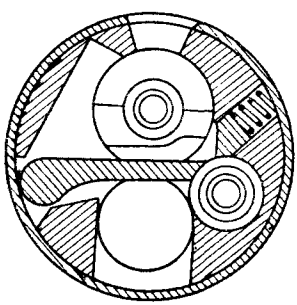


Рис. 82. Отражатель и гильзоуловитель.

В системах Кольта-Браунинга, Бреда и др. роль отражателя выполняет очередной патрон, поступающий в лапки затвора (см. рис. 79).

При наличии двух выбрасывателей (Льюис и др.) или лапок затвора круглого сечения отражатель делают в виде качающегося рычага, выдвигающего гильзу из-под зацепов затвора (рис. 82). В системах с качающимся затвором роль отражателя выполняет криволинейная нижняя поверхность затвора.

В некоторых системах, во избежание попадания гильз в подвижную систему при стрельбе под различными углами возвышения и склонения, устраиваются гильзоуловители, удерживающие гильзу в гильзоотводной трубке.

Выбрасыватель сравнительно часто ломается. Упрочнение выбрасывателя путем увеличения размеров далеко не всегда возможно из-за отсутствия места в затворе. Кроме подбора металла и соответствующей термической обработки, конструктивные меры следующие: выбирать очертания выбрасывателя без резких переходов и углов во избежание повышенных местных напряжений; строгая симметричность формы, исключающая возможность зацепления гильзы одним краем выбрасывателя.

§ 31. УДАРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Для производства выстрела в современных патронах необходимо разбить капсюль. Механизмы, осуществляющие это, называются *ударными*.

Неотъемлемой частью каждого ударного механизма является ударник, разбивающий капсюль.

По конструкции различаются ударные механизмы двух типов: 1) курковые и 2) ударниковые.

В курковых механизмах автоматического оружия тело определенной массы приводится в движение сжатой боевой пружиной. Оно сталкивается с ударником и передает ему часть своей живой силы; ударник, двигаясь вперед по инерции, разбивает капсюль.

В зависимости от характера движения курка различают два вида курковых механизмов:

а) с поступательным движением курка — пулемет Кольта (см. рис. 86);

б) с вращательным движением курка — пулемет Мадсена (см. рис. 67).

Во избежание самопроизвольного выстрела, в механизмах куркового типа продвижению ударника вперед (при подходе подвижной системы в крайнее переднее положение) препятствует пружина, расположенная в затворе перед ударником.

В ударниковых механизмах ударник получает энергию непосредственно от пружины; при этом различают два вида механизмов:

а) механизм с отдельной боевой пружиной (Максим, Бреда, Браунинг и др.);

б) механизм, работающий от возвратной пружины (ДА, Гочкис, Льюис и др.).

Ударниковый механизм, работающий от боевой пружины, конструируется в виде ударника, который сжимает боевую пружину, непосредственно действующую на него при оттягивании ударника назад. Ударник обычно имеет незначительный ход в затворе, становясь на боевой взвод при своем заднем положении по отношению к затвору (рис. 83).

Ударниковые механизмы, работающие от возвратной пружины (см. рис. 23), отличаются тем, что они находятся на боевом взводе при заднем положении подвижной системы. При этих механизмах не приходится заботиться о достаточной энергии ударника; наоборот, энергия подвижных частей избыточна и поглощается ударом о ствольную коробку или иную деталь неподвижной системы. Они дают возможность осуществить более простой спусковой механизм.

Для того чтобы ударный механизм работал безотказно, без осечек, ударник должен иметь определенный запас энергии, обеспечивающий разбитие капсюля. Необходимая величина энергии определяется родом капсюля: при пистолетных патронах достаточно энергии 0,02—0,03 *кгм*; для винтовочных капсюлей необходимо 0,07—0,08 *кгм*; для нашего капсюля энергия ударника, обеспечивающая безотказность, — 0,09 *кгм*. С увеличением калибра и упрочнением капсюля эта величина возрастает.

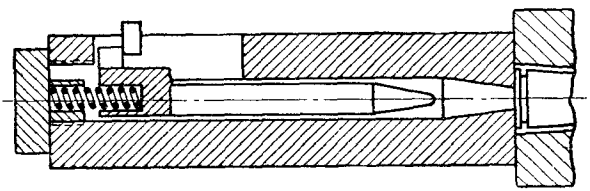


Рис. 83. Ударный механизм ударникового типа с боевой пружиной.

Часть ударника, непосредственно соприкасающаяся с капсюлем, называется *бойком*.

Боек наиболее часто ломается, что служит источником задержек при стрельбе. Отсюда вытекает необходимость:

а) предусмотреть такие условия работы бойка, которые обеспечивали бы его от ударов о какие-либо части затвора;

б) исключить возможность работы бойка на изгиб;

в) подвергать боек соответствующей термической обработке;

г) делать боек легко заменяемым — отдельно от ударника или, чаще, вместе с ним.

При решении вопроса о достаточной прочности бойка следует сравнивать проектируемый боек с конструкциями, зарекомендовавшими себя по прочности.

Конец бойка рекомендуется делать закругленным. Острые бойки менее прочны и увеличивают продолжительность воспламенения капсюля. Необходимо также, чтобы боек выступал за поверхность затвора на 1,5—2,0 *мм* (для обычных патронов).

Ударные механизмы в сочетании со спусковыми должны обеспечивать от самопроизвольного выстрела при не вполне закрытом затворе. В ударниковых механизмах, работающих от возвратной пружины, эту задачу выполняет обычно сам ударник или детали подвижной системы, действующие на ударник при движении вперед (см. рис. 62) и обеспечивающие запирание затвора. В основном — это выступы на штоке. В ме-

ханизмах другого типа эту функцию обычно выполняет спусковой механизм (см. рис. 86).

При проектировании авиационных пулеметов вопросу об ударных механизмах уделяется особое внимание.

Синхронные пулеметы, весьма широко распространенные в авиации, нуждаются в таком ударном механизме, который срабатывал бы в весьма малый промежуток времени. Время срабатывания должно быть постоянным для уменьшения рассеивания выстрелов по сектору круга, ометаемого воздушным винтом. Поэтому применение ударных механизмов, работающих от возвратной пружины, невозможно ввиду того, что вся подвижная система находится в крайнем заднем положении и время движения подвижных частей может резко изменяться в зависимости от смазки, загрязнения, температурных условий и углов возвышения или склонения.

При любой схеме ударного механизма, в применении к синхронным пулеметам, необходим минимальный по времени ход частей. Поэтому для синхронных пулеметов затвор и спусковые механизмы следует проектировать так, чтобы движущиеся части ударного механизма имели минимальное и практически постоянное время срабатывания.

Конструктивно это осуществляется следующим образом. Непосредственно перед выстрелом затвор занимает крайнее переднее положение (затвор заперт), и при воздействии на спусковой механизм приходит в движение только ударный механизм ударникового и куркового типа.

Рекомендовать схему ударного механизма для каждой конструкции оружия, вне связи с конструкцией автоматики и затвора, нельзя. Схема должна быть найдена в результате учета особенностей проектируемой системы.

§ 32. СПУСКОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Совокупность деталей, обеспечивающих освобождение ударного механизма или всей подвижной системы оружия, называется *спусковым механизмом*.

Устройство спускового механизма в различных видах автоматического оружия зависит от его задач и определяется необходимостью вести одиночный или автоматический огонь, а также и от типа ударного механизма.

Спусковые механизмы можно подразделить на два типа:

1) предназначенные только для автоматической стрельбы;

2) позволяющие вести и автоматический и одиночный огонь.

Наиболее простой вид спускового механизма получается при ударниковом механизме, действующем от возвратной пружины, и тогда, когда он предназначен только для автоматической стрельбы. Так, в пулемете ДА такой механизм состоит из спускового рычага *1*, спускового крючка *2* и его оси *3* и спусковой пружины *4* (рис. 84).

В авиационных пулеметах повышенной скорострельности с большой энергией движущейся от буферов подвижной системы, во избежание износа спусковых механизмов, устраивают „подрессоренные“ шептала (рис. 85).

Если же ударный механизм работает от боевой пружины, то, независимо от его устройства, необходимо взведенный курок или ударник удержать на боевом взводе до момента закрытия затвора. Спуск производится автоматически самим

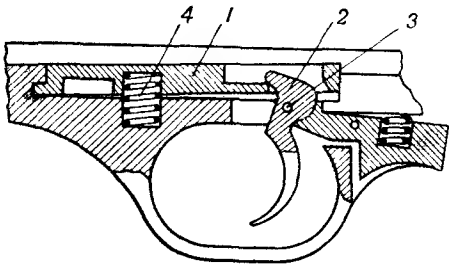


Рис. 84. Спусковой механизм пулемета ДА.

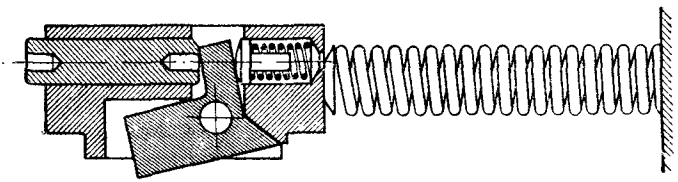


Рис. 85. „Подрессоренное“ шептало.

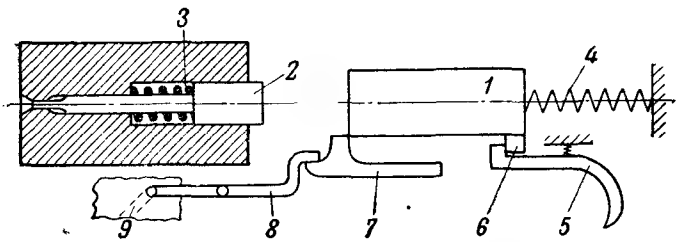


Рис. 86. Спусковой механизм Кольта.

закрывающимся затвором. Таким образом, для ведения автоматического огня возникает надобность в двух спусках: автоматическом и таком, который позволяет управлять огнем.

Примером спускового механизма для ведения автоматического огня может служить спусковой механизм Кольта. На рис. 86: *1* — поступательно движущийся курок; *2* — ударник; *3* — пружина ударника, отводящая его назад во избежание случайного выстрела при закрывании затвора; *4* — боевая пружина; *5* — спусковой крючок; *6* — шептало спуска; *7* — автоматический спуск; 8 — рычаг автоматического спуска; *9* — паз,

приподнимающий передний конец рычага 8 при запирании затвора.

Имеется ряд разработанных конструкций спусковых механизмов, позволяющих вести автоматический и одиночный огонь (ZB-26, Шоша и др.), в которых переход от одиночного огня к автоматическому достигается поворотом переводчика.

Иногда делаются отдельные спуски для одиночного и автоматического огня (Шательро, 20-*мм* пушка „Эрликон"). Такой способ нельзя признать удобным, так как всегда можно перепутать механизмы.

Обычно вместе со спусковым механизмом применяются предохранители — приспособления для выключения спускового механизма. Предохранители конструируются в виде стопора спускового крючка или в виде отключателя спускового крючка от шептала. Последний тип предпочтительнее, так как в этом случае в механизме не возникает излишних усилий.

Спусковые механизмы синхронных пулеметов, или, как их называют, *отрывные приспособления*, проектируются в полном согласовании с ударным механизмом.

Из теории синхронизации известно, что толчки, получаемые синхронизатором от мотора, и циклы автоматики не совпадают. Совпадение толчков синхронизатора и приход частей в крайнее переднее положение происходят лишь при некоторых режимах мотора. Это явление вместе с возможностью срабатывания синхронизатора в пределах определенного сектора кулачковой шайбы приводит к следующему:

1) возможности действия на спусковой механизм при не вполне запертом затворе;

2) увеличению разноса пуль в плоскости, ометаемой винтом;

3) изменению частоты стрельбы.

Для устранения этих недостатков в синхронном пулемете должно быть предусмотрено отрывное приспособление, устройство и действие которого определяются следующим. Отрывное приспособление является промежуточным механизмом между синхронизатором и спусковым механизмом пулемета и должно, независимо от действия автоматики пулемета, давать спуск только при вполне закрытом затворе и в пределах весьма малого сектора кулачковой шайбы.

При правильном проектировании авиационных пулеметов унификация всех их видов — крыльевых, синхронных и турельных — может быть достигнута в основном за счет конструкции спусковых механизмов. Этого можно достичь съемным затыльником или другой деталью, в которой монтируется спусковое устройство для соответствующего пулемета.

Глава VI

ОБЩИЕ МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ ДИФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ АВТОМАТИКИ

§ 33. ОСНОВАНИЯ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ

Для исследования работы автоматического оружия необходимо прежде всего выразить связь между механическими движениями отдельных деталей и силовыми воздействиями на них в форме дифференциальных уравнений, а затем решить эти уравнения теми или иными математическими приемами.

В существующих курсах механики не излагаются с должной полнотой и исчерпывающей ясностью те методы, которые для нашего курса имеют весьма важное значение. Это относится главным образом к методу редукции масс и моментов инерции как при постоянном, так и при переменном передаточном числе с учетом так называемого коэфициента полезного действия реального механизма.

Вопрос о включении коэфициента полезного действия в расчеты реальных механизмов стоит вообще гораздо острее, чем это принято думать, так как на практике коэфициент полезного действия колеблется, грубо говоря, в пределах $+1 > \eta > -1$, переходя через нулевые значения к отрицательным, например при самотормозящих передачах.

Но правильное определение коэфициента полезного действия механизма, работающего в нестационарных условиях, т. е. при режимах неустановившегося движения, возможно только тогда, когда известна форма движения, которая, в свою очередь, зависит от мгновенных значений коэфициента полезного действия.

Таким образом, здесь получается противоречие, которое нужно так или иначе разрешить. Для этого можно применить испытанный и хорошо известный метод последовательных приближений.

Первый способ — для ограниченного круга задач. Если ограничиться рассмотрением механизмов только с высокими значениями коэфициента полезного действия, то для решения таких вопросов в первом приближении все связи сначала при-

нимают за идеальные и затем вводят поправку на потери от трения.

При малых значениях коэфициента полезного действия этот прием не может дать удовлетворительных результатов, так как результаты будут представлять или медленно сходящийся или же совсем расходящийся ряд.

В самом деле, приняв $\eta = 1$, будем предполагать, что отыскивается форма движения, близкая к возможной. Но при $\eta \approx 0$ найденная форма движения окажется скорее близкой к невозможной, примером чему может служить отпирание затвора в пистолете-пулемете Томсона. Здесь предположение $f = 0$ и $\eta = 1$ привело бы к явному абсурду.

Второй способ — для любых случаев практики. Зададимся с самого же начала достаточно вероятными значениями коэфициента полезного действия; при этом отыскиваемая форма движения будет действительно близкой к возможной. Затем, если это потребуется, уточним решение обычными методами кинетостатики.

При рассмотрении метода редукции введем в расчет коэфициенты полезного действия передач, считая, что они известны в том или ином приближении.

Сущность метода редукции заключается в том, что при помощи его всякая задача на движение сложного механизма, представляющего собой несвободную систему материальных точек, сводится к простейшей задаче на движение свободной точки. Отсюда уже можно заключить, что основным видом диференциального уравнения при этом методе будет уравнение движения свободной материальной точки.

Из теоретической механики известно, что самое общее уравнение движения свободной материальной точки вытекает непосредственно из второго закона Ньютона, который формулируется так: „Приращение количества движения (по Ньютону: mutatio motus) пропорционально приложенной движущей силе и направлено по линии ее действия“:

$$\frac{d}{dt}(mu) = F. \tag{168}$$

Считая изменяющимися массу m и скорость u, получим в общем случае диференциальное уравнение движения точки переменной массы:

$$m\ddot{x} + u\frac{dm}{dt} = F, \tag{169}$$

а в частном случае, при $m = \text{const}$, — обычное уравнение:

$$m\ddot{x} = F.$$

В дальнейшем рассмотрим только уравнения вида (168) и (169), так как частные случаи будут вытекать из них сами собой.

Коэфициент пропорциональности m, стоящий при ускорении $\ddot{x}$ в формуле (169), является массой тела в данный момент времени t. Второй член в левой части формулы определяет расход силы на сообщение непрерывно присоединяющейся к телу или отделяющейся от него массе в единицу времени $\frac{dm}{dt}$ количества движения $u\frac{dm}{dt}$.

Вектор $J_1 = -m\ddot{x}$, равный по величине произведению массы точки m на ее ускорение $\ddot{x}$ и направленный противоположно ускорению, принято называть силой инерции материальной точки.

Вектор $J_2 = -u\frac{dm}{dt}$ будем называть *прибавочной* силой инерции тех „изменяющих" (по терминологии проф. И. В. Мещерского) масс, которые присоединяются к телу или отделяются от него в течение бесконечно-малого промежутка времени dt.

Силы инерции J_1 и J_2, в полном согласии с третьим законом Ньютона о равенстве действия и противодействия, т. е. силы и реакции, представляют не что иное, как кинетические реакции точки M на тело S, действие которого на точку M выражается силой F.

Установление понятия о силах инерции позволяет переписать уравнение динамики (169) в форме:

$$F - m\ddot{x} - u\frac{dm}{dt} = 0,$$

или

$$F + J_1 + J_2 = 0, \tag{170}$$

напоминающей уравнение статического равновесия сил.

Но следует помнить, что в статике все векторы, входящие в уравнение равновесия, являются силами, действующими на данную точку M; поэтому они складываются геометрически в одну равнодействующую, равенство нулю которой дает условие статического равновесия и покоя системы.

Что же касается уравнений динамики, написанных в форме (170), то здесь сила F и силы J_1, J_2 приложены к разным телам, так что хотя они все и реальны, но складывать их геометрически можно лишь условно, не придавая этой операции физического смысла замены данной системы сил одной „равнодействующей"[1].

Изложив кратко эти аксиомы и определения механики, относящиеся к составлению уравнений движения свободной матери-

[1] См. проф. Л. Г. Лойцянский и А. И. Лурье, Курс теоретической механики, ч. II, 1938.

альной точки, перейдем к вопросу о движении несвободной системы материальных точек со связями.

Если какое-либо тело в своем движении приходит в соприкосновение с другим телом, то в точке их встречи возникают две равные и противоположно направленные силы R и $-R$.

Рассматривая силу R как действие одного тела на другое, следует считать силу $-R$ реакцией второго тела на первое, и наоборот. Следовательно, прикладывая к системе в точке соприкосновения тел две силы, R и $-R$, можно освобождаться от связей, заменяя последние реакциями, определяемыми далее из уравнений движения.

Но еще удобнее воспользоваться принципом Даламбера и выразить неизвестные реакции связи R_i через приложенные к каждому звену силы F_i и кинетические реакции $J_i = -m_i \ddot{s}_i$, равные силам инерции.

Дело в том, что, в отличие от движения свободной точки, для которой *приложенная сила* F_i является вместе с тем *движущей силой* (force motrice), в случае несвободной точки, на основании принципа освобождаемости от связей, движущей силой D_i будет векториальная сумма приложенной силы F_i и реакции связи R_i:

$$D_i = F_i + R_i = m_i \ddot{s}_i .$$

Даламбер назвал *потерянной силой* (force perdue) разность между приложенной силой F_i и движущей силой D_i, создавшейся вследствие влияния связей:

$$P_i = F_i - D_i = F_i - m_i \ddot{s}_i = -R_i. \qquad (171)$$

Таким образом, потерянная сила равна по величине и противоположна по направлению реакции связи R_i и представляет собой кинетическое воздействие движущейся точки на связь. Поэтому, отбрасывая какое-либо звено кинематической цепи, необходимо его действие на связь заменить действием потерянной силы.

§ 34. МЕТОД РЕДУКЦИИ МАСС И МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ

В механизмах обычно связи бывают:

1) удерживающими точку на заданной поверхности или кривой;

2) голономными (от греческих слов: ὅλος — целый и νόμος — закон), т. е. зависящими только от координат точки, а иногда и времени t, но не зависящими от производных координат по времени;

3) стационарными, т. е. даже не зависящими явно от времени.

Если механизмы обладают одной степенью свободы, то перемещения любого звена однозначным образом связаны с перемещениями другого, тоже любого, звена, которое можно принять за основное. Эта связь устанавливается передаточным числом z,

определяемым как отношение виртуальных скоростей или перемещений основного звена δx и побочного звена δy:

$$z = \frac{\delta x}{\delta y} = \frac{\dot{x}}{\dot{y}} = z(x). \tag{172}$$

При выводе формул будем иметь в виду простейшую кинематическую схему, состоящую из двух звеньев: основного звена A и побочного звена B, так как распространение метода редукции на большее число звеньев никаких принципиальных затруднений не представит, кроме усложнения самих формул.

Массы каждого звена будем считать постоянными, а передаточное число $z(x)$ — величиной переменной; последнее обстоятельство и отразится, как увидим далее, на составлении дифференциального уравнения движения основного звена, к которому будем приводить силы и массы прочих звеньев; так что в результате получим уравнение вида (168) или (169).

Кроме зависимости (172), будем пользоваться также обратным отношением:

$$\zeta = \frac{1}{z} = \frac{\delta y}{\delta x} = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \zeta(x). \tag{173}$$

Из равенства (173) находим соотношение между скоростями:

$$\dot{y} = \dot{x}\zeta(x) = u\zeta, \tag{174}$$

а после дифференцирования по t — зависимость между ускорениями:

$$\ddot{y} = \ddot{x}\zeta + \dot{x}\frac{d\zeta}{dt} = \ddot{x}\zeta + u\frac{d\zeta}{dx}\cdot\frac{dx}{dt} = \ddot{x}\zeta + u^2\frac{d\zeta}{dx}. \tag{175}$$

Примечание. Следует обратить внимание на то, что для получения ускорения $\ddot{y}$, от которого зависят силы инерции побочного звена B, мы продифференцировали выражение (174) скорости $\dot{y}$, представленной как произведение скорости u основного звена A на множитель ζ, стоящий при скорости u и, следовательно, непосредственно к ней относящийся. Это замечание существенно и будет использовано в дальнейшем ссылками на эти формулы.

Пусть m_0 — масса основного звена;
X — сумма проекций на направление δx всех приложенных к звену сил;
m_1 — масса побочного звена;
Y_1 — сумма проекций на направление δy всех приложенных к этому звену сил.

Действие побочного звена на связь выражается потерянной силой

$$P = -R = Y_1 - m_1\ddot{y}. \tag{176}$$

Отбросим это звено и заменим его действие отображенной потерянной силой или кинетической реакцией на направлении δx:

$$\Pi = -\rho = \Phi_1 - \mu_1 \ddot{x}, \tag{177}$$

присоединяющейся к действующим на основное звено силам при наложении связей. Вследствие этого уравнение движения основного звена примет вид:

$$X - \rho - m_0 \ddot{x} = 0. \tag{178}$$

Сопоставив между собой выражения (176) и (177), установим почленным делением второго равенства на первое такое соотношение:

$$\frac{\Pi}{P} = \frac{\rho}{R} = \frac{\Phi_1 - \mu_1 \ddot{x}}{Y_1 - m_1 \ddot{y}} = \psi_i, \tag{179}$$

дающее коэфициент отображения, или *коэфициент приведения сил* с направления δy на направление δx, включая не только статические силы Y_1, но и кинетические реакции $-m_1 \ddot{y}$.

Этот коэфициент приведения сил найдем из уравнения работ реакции ρ на направлении δx и реакции R на направлении δy с учетом коэфициента полезного действия.

Следует иметь в виду, что принятый в прикладной механике термин „коэфициент полезного действия" не вполне удачен, так как в некоторых случаях, например в червячных передачах, коэфициент полезного действия может принимать и отрицательные значения; тогда, по существу, он становится как бы „коэфициентом вредного действия".

Однако встречаются механизмы, где такого рода самотормозящие передачи применяются с пользой для дела, например в механизмах вертикального наведения — для предупреждения проворота лебедки при откате орудия; в механизмах горизонтального наведения — для устранения разворота башни или турели при выстреле из эксцентрично расположенного орудия и т. д.

Поэтому лучше было бы называть *коэфициентом отдачи* рассматриваемого механизма тот множитель, при помощи которого устанавливается баланс между работой на направлениях δx и δy.

В механизмах с удерживающими связями, т. е. двустороннего действия, необходимо различать, какой стороной работает связь: лобовой или тыловой, т. е. передней или задней по отношению к направлению движения, в соответствии с чем будем иметь:

а) коэфициент отдачи лобового действия η_i;

б) коэфициент отдачи тылового действия η_i'.

Эти понятия существенно различны. Так, в обратимых передачах лобовое действие основного звена A соответствует ведущей роли звена A, которое расходует энергию, приводя в дви-

жение побочное звено $Б$ и теряя при этом часть энергии на преодоление сил трения в передаче.

В случае „а“ баланс работы реакций ρ и R на направлениях δx и δy запишется в виде:

$$\eta\rho\,\delta x = R\,\delta y,$$

откуда

$$\rho = \frac{1}{\eta}\cdot\frac{\delta y}{\delta x}R = \psi R. \tag{180}$$

В случае „б“ основное звено испытывает тыловое действие реакции и потому оказывается ведомым за счет энергии побочного звена $Б$. Тогда баланс работы должен быть записан в виде:

$$\rho\,\delta x = \eta' R\,\delta y,$$

откуда

$$\rho = \eta'\frac{\delta y}{\delta x}R = \psi' R. \tag{181}$$

Коэфициенты η и η' определяются по обычным формулам прикладной механики или из опыта. Для обратимых передач значения коэфициентов η и η' отличаются от единицы на малый процент потерь в передаче, и потому их удобно представлять в форме:

$$\eta = 1-\varepsilon;$$

$$\eta' = 1-\varepsilon' \approx 1-\varepsilon.$$

Это упрощает запись выражений для коэфициентов приведения сил:

$$\psi = \frac{1}{\eta}\cdot\frac{\delta y}{\delta x} = \frac{1}{\eta}\zeta = \frac{1}{1-\varepsilon}\zeta \approx (1+\varepsilon)\zeta; \tag{182}$$

$$\psi' = \eta'\frac{\delta y}{\delta x} = \eta'\zeta = (1-\varepsilon')\zeta \approx (1-\varepsilon)\zeta. \tag{183}$$

В необратимых передачах, называемых также *самотормозящими*, коэфициенты η и η' значительно разнятся. Для червячных передач с упорными шарикоподшипниками их можно писать в таком виде:

$$\eta = \operatorname{tg}\beta\frac{1-f\cdot\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\beta+f} = \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}(\beta+\varkappa)}; \tag{184}$$

$$\eta' = \frac{1}{\operatorname{tg}\beta}\cdot\frac{\operatorname{tg}\beta-f}{1+f\cdot\operatorname{tg}\beta} = \frac{\operatorname{tg}(\beta-\varkappa)}{\operatorname{tg}\beta}. \tag{185}$$

Нетрудно видеть, что коэфициент η' представляет собой обращение формулы (184) с одновременным обращением знака у коэфициента трения f, причем здесь

$$\zeta = \frac{\delta y}{\delta x} = \operatorname{tg}\beta, \tag{186}$$

где β — угол наклона нитки червяка по отношению к плоскости, перпендикулярной к его оси.

Следовательно, для необратимых передач получим значения ψ_i:

$$\psi = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\delta y}{\delta x} = \operatorname{tg}(\beta + \varkappa); \tag{187}$$

$$\psi' = \eta' \frac{\delta y}{\delta x} = \operatorname{tg}(\beta - \varkappa). \tag{188}$$

Возвращаясь к равенству (179), найдем:

$$p = \psi_i R;$$

$$\Phi_1 - \mu_1 \ddot{x} = \psi_i (Y_1 - m_1 \ddot{y}).$$

Подставляя сюда значение $\ddot{y}$ из формулы (175), получим:

$$\begin{aligned} \Phi_1 - \mu_1 \ddot{x} &= \psi_i Y_1 - \psi_i m_1 \left(\ddot{x}\zeta + u^2 \frac{d\zeta}{dx} \right) = \\ &= \psi_i \left(Y_1 - m_1 u^2 \frac{d\zeta}{dx} \right) - \psi_i \zeta m_1 \ddot{x} = \\ &= \psi_i \left(Y_1 - m_1 u^2 \frac{d\zeta}{dx} \right) - \varphi_i m_1 \ddot{x}. \end{aligned} \tag{189}$$

Левая часть этого равенства представляет собой условную форму записи отображаемых на направление δx потерянных сил побочного звена; поэтому можно положить:

$$\Phi_1 = \psi_i \left(Y_1 - m_1 u^2 \frac{d\zeta}{dx} \right); \tag{190}$$

$$\mu_1 = \psi_i \zeta m_1 = \varphi_i m_1. \tag{191}$$

После всех указанных преобразований перепишем уравнение (178) движения основного звена:

$$X - p - m_0 \ddot{x} = 0$$

в окончательной форме, принимая во внимание равенства (177) и (189):

$$(m_0 + \varphi_i m_1) \ddot{x} = X + \psi_i \left(Y_1 - m_1 u^2 \frac{d\zeta}{dx} \right), \tag{192}$$

а уравнение побочного звена

$$Y_1 + R - m_1 \ddot{y} = 0 \tag{193}$$

на основании формулы (175) в виде:

$$Y_1 - m_1 u^2 \frac{d\zeta}{dx} + R - \zeta m_1 \ddot{x} = 0. \tag{194}$$

В формуле (192) величина $\varphi_i m_1$, присоединяющаяся к массе m_0 основного звена, может быть названа *приведенной массой* побочного звена. Множитель $\varphi_i = \psi_i \zeta$ будем называть *коэфициентом приведения масс*.

Но формула (192) является еще не вполне определенной, ввиду того, что пока неизвестно, какой из двух множителей — ψ или ψ' — надо включить в нее. Чтобы решить этот вопрос, подвергнем специальному исследованию уравнения (178) и (192) — (194).

Для этого прежде всего заметим, что, на основании уравнений (178) и (194), действительное ускорение $\ddot{x}$ основного звена механизма может быть выражено двояким образом:

$$\ddot{x} = \frac{X}{m_0} - \frac{p}{m_0} = (\ddot{x})_0 - \psi_i \frac{R}{m_0}; \tag{195}$$

$$\ddot{x} = z\left(\frac{Y_1}{m_1} - u^2 \frac{d\zeta}{dx}\right) + z\frac{R}{m_1} = (\ddot{x})_1 + z\frac{R}{m_1}, \tag{196}$$

где $(\ddot{x})_0$ — ускорение свободного движения основного звена A, т. е. без связей;

$(\ddot{x})_1$ — отображенное на направление δx ускорение побочного звена $Б$ при нулевом значении реакции связи ($R = 0$).

После этого получим следующее очевидное равенство:

$$(\ddot{x})_0 - \psi_i \frac{R}{m_0} = \ddot{x} = (\ddot{x})_1 + z\frac{R}{m_1}. \tag{197}$$

Отсюда

$$(\ddot{x})_0 = (\ddot{x})_1 + z\frac{R}{m_1} + \psi_i \frac{R}{m_0} = (\ddot{x})_1 + z\frac{R}{m_1}\left(1 + \psi_i \zeta \frac{m_1}{m_0}\right);$$

$$(\ddot{x})_0 = (\ddot{x})_1 + z\frac{R}{m_1}\left(1 + \frac{\varphi_i m_1}{m_0}\right) =$$

$$= (\ddot{x})_1 + z\frac{m_0 + \varphi_i m_1}{m_0 m_1} R = (\ddot{x})_1 + z\frac{m}{m_0 m_1} R, \tag{198}$$

где $m = m_0 + \varphi_i m_1$ означает суммарную эквивалентную массу на направлении δx.

Само собой разумеется, что эта масса $m = m_0 + \varphi_i m_1$ должна быть величиной существенно положительной, так как в противном случае уравнение (192) теряет всякий физический смысл.

Формулы (197) и (198) позволяют установить совершенно четкие признаки для выбора значений коэфициентов ψ_i. Для более удобного пользования эти признаки сведены в таблицу 12.

Таблица 12

Основные признаки				Второстепенные признаки	
Соотношение между ускорениями	Реакция R	Действие связи	Коэфициент ψ_i	Действительное ускорение $\ddot{x}$	Звено A
$(\ddot{x})_0 > (\ddot{x})_1$	$R > 0$	Лобовое	$\psi > 0$	$\ddot{x} < (\ddot{x})_0$	Ведущее
$(\ddot{x})_0 = (\ddot{x})_1$	$R = 0$	Связь не напряжена	На результат не влияет	$\ddot{x} = (\ddot{x})_0$	Автономное движение обоих звеньев
$(\ddot{x})_0 < (\ddot{x})_1$	$R < 0$	Тыловое	$\psi' > 0$	$\ddot{x} > (\ddot{r})_0$	Ведомое
$(\ddot{r})_0 < (x)_1$	$R < 0$	„	$\psi' < 0$	$\ddot{x} < (\ddot{r})_0$	Сопровождающее

В последней строке таблицы звено A названо *сопровождающим*, что вытекает из физического смысла явления, так как при $R < 0$ звено B, казалось бы, должно играть роль ведущего, а звено A — роль ведомого. Это и отмечено в предпоследней строке таблицы 12 при $\psi' > 0$, т. е. при несамотормозящей передаче. При самотормозящей же передаче ψ' становится отрицательным, и звено B не может вести звено A, которое по этой причине не может стать ведомым, но не является никоим образом и ведущим. В этом случае звено A, по морской терминологии, будет „травить“ звено B, не позволяя последнему забегать вперед.

Значения коэфициентов приведения сил ψ_i выпишем в таблицу 13, чтобы не искать в тексте формул (182), (183), (187) и (188), по которым они рассчитываются.

Таблица 13

Случаи	Обратимые передачи	Необратимые передачи
Лобовое действие связи	$\psi = (1 + \varepsilon)\,\zeta$	$\psi = \operatorname{tg}(\beta + \varkappa)$
Тыловое действие связи	$\psi' = (1 - \varepsilon)\,\zeta$	$\psi' = \operatorname{tg}(\beta - \varkappa)$

При расчетах автоматики чаще приходится пользоваться численными методами интегрирования дифференциальных уравнений вида (192):

$$(m_0 + \varphi_i m_1)\ddot{x} = X + \psi_i\left(Y_1 - m_1 u^2 \frac{d\zeta}{dx}\right).$$

Тогда следует вписывать в определенную строку расчетной таблицы ускорения

$$(\ddot{x})_0 = \frac{X}{m_0}$$

свободного движения основного звена A и в соседнюю строку — ускорения

$$(\ddot{x})_1 = z\left(\frac{Y_1}{m_1} - u^2\frac{d\zeta}{dx}\right)$$

звена B, отображенные на направление δx при отсутствии реакции связей. По их соотношению будем выбирать при помощи таблицы 13 значения коэфициентов ψ_i.

Если бы части механизма имели вращательное движение, то приведенные формулы остались бы в силе, только в них пришлось бы заменить:

1) массы — моментами инерции i;

2) приложенные силы — моментами M;

3) поступательные перемещения, скорости и ускорения x, u, $\ddot{x}$ — соответствующими угловыми величинами θ, ω, $\ddot{\theta}$, относящимися к вращательному движению.

В этом случае коэфициенты приведения ψ_i остаются без изменения. Когда же исследуется механизм с поступательно движущимися и вращающимися частями, то уравнение движения можно приводить к той или иной форме, определяя величины приведенных масс или моментов инерции по формулам для „идеального“ случая:

$$\mu = \frac{i_1\omega_1^2}{u^2}, \tag{199}$$

$$i = \frac{m_1u_1^2}{\omega^2} \tag{200}$$

с последующим включением коэфициента отдачи η_i по установленным выше признакам.

Таблицу признаков подкрепим численным примером, в котором одна и та же задача решается при различных значениях коэфициента трения f.

Пример. Основное звено подающего механизма автоматики представляет собой планку A с наклонным гребнем, который охватывается роликами побочного звена B.

Требуется найти значение действительного ускорения основного звена M, совершающего движение по уравнению:

$$(m_0 + \varphi_i m_1)\,\ddot{x} = X + \psi_i Y_1$$

в различные моменты времени t при следующих данных:

$$m_0 = 0{,}10; \quad X = 3{,}50 - t;$$
$$m_1 = 1{,}00; \quad Y_1 = 1{,}20.$$

Обращенное передаточное число, определяемое профилем планки:

$$\zeta = \frac{\delta y}{\delta x} = \operatorname{tg}\beta = 0{,}10.$$

Расчет произвести для двух случаев.
Случай 1. Передача несамотормозящая; $f=0{,}05$.
Случай 2. Передача самотормозящая; $f=0{,}15$.

Ход решения

t	0	1	2	3	4	Примечание
X	3,50	2,50	1,50	0,50	—0,50	
$(\ddot{x})_0$	35,0	25,0	15,0	5,00	—5,00	Основные признаки
$(\ddot{x})_1$	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	
Действие связи	Лобовое $\psi \approx \operatorname{tg}\beta + f$, $\varphi = \psi\zeta$			Тыловое $\psi' \approx \operatorname{tg}\beta - f$, $\varphi' = \psi'\zeta$		По соотношению $(\ddot{x})_0$ и $(\ddot{x})_1$
ψ_i	0,15	0,15	0,15	0,05	0,05	Случай 1 $f=0{,}05$ $\operatorname{tg}\beta > f$
φ_i	0,015	0,015	0,015	0,005	0,005	
$X+\psi_i Y_1$	3,68	2,68	1,68	0,56	—0,44	
$m_0+\varphi_i m_1$	0,115	0,115	0,115	0,105	0,105	
$\ddot{x}$	32,0	23,3	14,6	5,33	—4,19	
Звено A	Ведущее			Ведомое		
ψ_i	0,25	0,25	0,25	—0,05	—0,05	Случай 2 $f=0{,}15$ $\operatorname{tg}\beta < f$
φ_i	0,025	0,025	0,025	—0,005	—0,005	
$X+\psi_i Y_1$	3,80	2,80	1,80	0,44	—0,56	
$m_0+\varphi_i m_1$	0,125	0,125	0,125	0,095	0,095	
$\ddot{x}$	30,4	22,4	14,4	4,63	—5,90	
Звено A	Ведущее			Сопровождающее		

На практике часто можно обойтись без составления подобной таблицы, так как лобовое и тыловое действие связи может быть очевидным, хотя оно вообще не определяется знаком ускорения $\ddot{x}$, т. е. не характеризуется терминами „ускорение“ или „замедление“.

§ 35. ЗАКОНЫ ТРЕНИЯ. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕДУКЦИИ К НЕКОТОРЫМ ЗАДАЧАМ АВТОМАТИКИ

До настоящего времени трение не изучено с исчерпывающей для практических целей полнотой, хотя в технике постоянно приходится иметь с ним дело. Тем не менее некоторые законы все же можно считать установленными, а именно:

1. Для данных тел сила трения пропорциональна величине нормального давления

$$T = f \cdot N \qquad (201)$$

и действует в касательной плоскости по направлению, обратному относительному перемещению тел при скольжении или тому перемещению, которое происходило бы при отсутствии трения, например в случае касательной реакции рельса при качении.

2. Коэфициент трения f зависит от материала и состояния трущихся поверхностей, т. е. от качества отделки деталей при их производстве, условий смазки, температуры и т. д.

3. Коэфициент трения зависит:

а) от удельного давления;

б) от относительной скорости скольжения.

По опытам Рени (Rennie), коэфициент трения изменяется в функции удельного давления, начиная от 8—10 $кг/см^2$ до предела смятия поверхностей при 45—60 $кг/см^2$, так что отношение предельных значений f равно:

железо по железу	3,0
чугун по железу	2,5
сталь по чугуну	2,5
латунь по чугуну	1,5

В расчетах автоматики будем принимать значения *среднего взвешенного* коэфициента трения, в зависимости от материала трущихся поверхностей, как некий номинал:

для стали по стали . . . $f = 0{,}10 \pm 50\%$;
для бронзы по стали . . . $f = 0{,}07 \pm 50\%$,

при всех условиях нормальной работы механизмов, кроме явления удара.

Повышение коэфициента трения при ударе вследствие резко возрастающего удельного давления будем учитывать введением в расчет добавочного множителя 1,50—2,00, считая, что в осуществляемых конструкциях удельное давление и при ударе не достигает предела смятия поверхностей.

Зависимость f от скорости v ($м/сек$) относительного скольжения Боше (Bochet) выражает формулой

$$f = a + \frac{b}{1 + 0{,}3v}.$$

По новейшим данным Грёч и Плаке [1] (G. Grötsch и E. Plake), коэфициент трения стали по стали довольно точно выражается формулой:

$$f = f_0 \frac{1 + av}{1 + bv}; \qquad (202)$$

$$\lim f = f_0 \frac{a}{b}.$$

Они производили опыты в широком диапазоне скоростей. Стрельба велась из гладкого ствола специально изготовлен-

[1] „Zeitschrift für das gesamte Schiess- und Sprengstoffwesen" № 1, 1940.

ными снарядами с тонкостенным гильзообразным придатком у донной части; из опыта получено:

$$f_0 = 0{,}27;$$
$$a = 0{,}0044;$$
$$b = 0{,}0640.$$

В наших расчетах не будем принимать во внимание фактор скорости, но при установлении номинала коэфициента трения будем считаться с довольно правдоподобной закономерностью (202).

Пример 1. Представим развертку центровой спиральной линии некоторого пространственного механизма барабанного типа, могущего служить для подачи патронов от ленты к приемному окну.

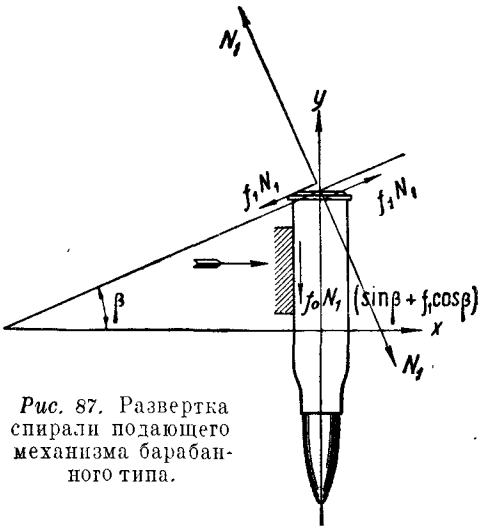


Рис. 87. Развертка спирали подающего механизма барабанного типа.

При движении гнезда по направлению касательной δx шляпка патрона скользит фактически по двум винтовым пазам, образованным на поверхностях двух концентрических барабанов, а в нашей упрощенной теоретической модели — по воображаемому винтовому пазу, где возбуждается нормальная реакция N_1 и касательная реакция f_1N_1 (рис. 87).

Масса патрона M_c (индекс c от французского cartouche — патрон) вследствие этого приобретает движение не только по направлению δx, но и увлекается по направлению δy, встречая на своем пути сопротивление F_c, например при извлечении патрона из звена.

Допустим, что заданы следующие величины:

$M = \frac{I}{r^2}$ — приведенная к перемещению в направлении δx масса самого гнезда, если это гнездо принадлежит зубчатке с моментом инерции I;

Q — сила, толкающая гнездо;
F — сопротивление движению гнезда от натяжения пулеметной ленты;
$f_1 = 0{,}15$ — коэфициент трения по пазу;
$f_0 = f_2 = 0{,}10$ — коэфициент трения по гнезду и торцу зубчатки;
$\operatorname{tg}\beta = 0{,}425$ — тангенс угла наклона винтового паза.

Требуется написать диференциальное уравнение движения гнезда.

Прежде всего определим проекции реакций связи на направления δx и δy, согласно схеме сил, представленных на рис. 87, при лобовом действии связи:

$$\rho = N_1(\sin\beta + f_1 \cdot \cos\beta); \tag{203}$$

$$R = N_1[\cos\beta - f_1 \cdot \sin\beta - f_0(\sin\beta + f_1 \cdot \cos\beta)]. \tag{204}$$

Силами трения по торцу зубчатки пренебрегаем, как величинами второго порядка малости.

На основании формулы (180) отсюда находим непосредственно коэфициент приведения сил при лобовом действии связи

$$\psi = \frac{\rho}{R} = \frac{\operatorname{tg}\beta + f_1}{1 - f_0 f_1 - (f_0 + f_1)\operatorname{tg}\beta} \tag{205}$$

и коэфициент приведения масс

$$\varphi = \psi\zeta = \psi \cdot \operatorname{tg}\beta. \tag{206}$$

При тыловом действии связи найдем выражения коэфициентов ψ' и φ' из формул (205) и (206), переменив знаки у всех коэфициентов трения. Получим:

$$\psi' = \frac{\operatorname{tg}\beta - f_1}{1 - f_0 f_1 + (f_0 + f_1)\operatorname{tg}\beta}; \tag{207}$$

$$\varphi' = \psi \cdot \operatorname{tg}\beta. \tag{208}$$

При расчетах автоматики, найдя численные значения коэфициентов приведения, запишем их в форме:

$$\psi = \frac{\operatorname{tg}\beta + f_1}{1 - f_0 f_1 - (f_0 + f_1)\operatorname{tg}\beta} = 0{,}652; \quad \varphi = \psi \cdot \operatorname{tg}\beta = 0{,}277;$$

$$\psi' = \frac{\operatorname{tg}\beta - f_1}{1 - f_0 f_1 + (f_0 + f_1)\operatorname{tg}\beta} = 0{,}252; \quad \varphi' = \psi' \cdot \operatorname{tg}\beta = 0{,}107.$$

Диференциальное уравнение движения гнезда представится теперь в виде:

$$(M + M_c + \varphi_i M_c)\ddot{x} = Q - F - \psi_i F_c. \tag{209}$$

Пример 2. Требуется написать дифференциальное уравнение движения штока автоматики системы с отводом пороховых газов при следующих условиях.

Масса штока $M_{ш}$ приводится в движение давлением пороховых газов $P(t)$ на поршень и встречает сопротивление возвратной пружины $F_{ш}=kx$. Шток связан с планкой, снабженной профильным гребнем (см. рис. 96 на стр. 234). Гребень охватывается роликами ползуна, который скользит в направляющих по направлению KL с сопротивлением F_1 и несет на себе массу m_1.

Напишем дифференциальное уравнение движения:

$$(M_{ш}+\varphi_i m_1)\ddot{x}=P(t)-kx-\psi_i\left(F_1+m_1u^2\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}\right). \qquad (210)$$

Последний член в скобках правой части в данном случае имеет очень простой физический смысл. Действительно,

$$m_1u^2\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}=m_1u\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dt}=m_1u\frac{d\operatorname{tg}\theta}{d\theta}\cdot\frac{d\theta}{ds}\cdot\frac{ds}{dt}=$$

$$=\frac{m_1u}{\cos^2\theta}\cdot\frac{1}{\rho}v=\frac{m_1v^2}{\rho}\cdot\frac{1}{\cos\theta}, \qquad (211)$$

где $v=\frac{ds}{dt}$ — касательная скорость точки ползуна при движении по кривой профиля;

$\frac{d\theta}{ds}=\frac{1}{\rho}$ — кривизна профиля в точке C;

$\frac{m_1v^2}{\rho}$ — центробежная сила инерции.

Из равенства (211) следует, что

$$\left(m_1u^2\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}\right)\cos\theta=\frac{m_1v^2}{\rho}, \qquad (212)$$

т. е. что проекция кинетической реакции массы m_1, приводимой в движение вдоль линии KL, на направление нормали к профилю гребня в точке C равна центробежной силе инерции.

§ 36. ОБЩИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТОЧКИ ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ В ФОРМЕ, ДАННОЙ проф. И. В. МЕЩЕРСКИМ

Уравнение (210) или

$$(m_0+\varphi_i m_1)\ddot{x}=X+\psi_iY_1-\psi_im_1u^2\frac{d\zeta}{dx}=X'-\psi_im_1u^2\frac{d\zeta}{dx} \qquad (213)$$

являются частным видом уравнений движения точки переменной массы (168) или

$$\frac{d}{dt}(mu)=m\ddot{x}+u\frac{dm}{dt}=F. \qquad (214)$$

Но если в формуле (214) под m подразумевается действительная масса точки, определяемая Ньютоном как quantitas materiae, т. е. количество вещества, то в формуле (213) $m = m_0 + \varphi_i m_1$ есть расчетная эквивалентная масса механического привода, причем часть этой массы $\varphi_i m_1$ „приведена" с побочного звена B на основное звено A.

Таким образом, масса m_1 побочного звена B благодаря механическим связям ощущается как реальная масса $\varphi_i m_1$ звена A, только не в смысле ньютоновского определения массы, а в смысле определения Аппеля [1]:

„Масса материальной точки есть постоянное отношение, существующее между величиной постоянной силы и ускорением, которое оно сообщает точке".

Поэтому на звене A можно обращаться с приведенной массой $\varphi_i m_1$, как с реальной массой, кроме того случая, когда понадобилось бы ее диференцировать. Последнее исключение объясняется условиями составления приведенной массы $\varphi_i m_1$, которая образовалась как произведение $m_1\zeta$ на коэфициент ψ_i, введенный в уравнение (213) уже после зарождения кинетической реакции $-R = Y_1 - m_1\ddot{y}$ по ту сторону связи. Диференцирование же массы $\varphi_i m_1$ потребуется при всякой попытке привести уравнение (213) к форме (214) или к форме:

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{mu^2}{2}\right) = F, \tag{215}$$

как общим приемам составления диференциальных уравнений движения свободной точки.

Теперь покажем, как преобразовывать уравнения (213) к виду (214) или (215).

Условимся называть все величины, входящие в уравнение (213), по терминологии проф. И. В. Мещерского, следующим образом:

m_0 — изменяемая масса;

$\varphi_i m_1$ — изменяющая масса;

$m = m_0 + \varphi_i m_1$ — переменная масса;

$-\psi_i m_1 u^2 \dfrac{d\zeta}{dx}$ — прибавочная сила;

$X' = X + \psi_i Y_1$ — сумма проекций всех сил, действующих на направлении δx.

Заметим, что в механических приводах или устройствах величины ζ, η, η', ψ_i и φ_i являются функциями координат (если не считаться с тем, что η и η', а следовательно, и ψ_i и φ_i вообще будут функциями еще от удельных давлений и относительных скоростей). Тогда

$$\psi_i = \frac{\zeta(x)}{\eta(x)} \text{ или } \eta'(x)\cdot\zeta(x); \tag{216}$$

$$\varphi_i = \frac{\zeta^2(x)}{\eta(x)} \text{ или } \eta'(x)\cdot\zeta^2(x). \tag{217}$$

[1] Appel, Traité de mécanique rationnelle, t. I, 1893, p. 87.

Применительно к формулам (214) и (215) для получения уравнения (213) необходимо выполнить следующие преобразования.

В первом случае

$$\frac{d}{dt}(mu)=\frac{d}{dt}\left[\left(m_0+\psi_i\zeta m_1\right)u\right]=$$

$$=m\ddot{x}+\psi_i m_1 u\frac{d\zeta}{dt}=m\ddot{x}+\psi_i m_1 u^2\frac{d\zeta}{dx}=X'. \qquad (218)$$

Здесь ψ_i вынесено за знак дифференциала как величина постоянная, вернее, как величина, не подлежащая дифференцированию по времени t в соответствии с указаниями, сделанными выше и в примечании после формулы (175).

Во втором случае

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{mu^2}{2}\right)=\frac{d}{dx}\left[\frac{1}{2}\left(m_0+\eta_i\zeta^2 m_1\right)u^2\right]=\frac{m}{2}2u\frac{du}{dx}+\frac{u^2}{2}\cdot\frac{dm}{dx}=$$

$$=m\ddot{x}+\frac{u^2}{2}\eta_i m_1 2\zeta\frac{d\zeta}{dx}=m\ddot{x}+\psi_i m_1 u^2\frac{d\zeta}{dx}=X'. \qquad (219)$$

При этом дифференцировании величина, условно обозначенная нами $\eta_i=\frac{1}{\eta}$ или η', вынесена за знак дифференциала как величина, не подлежащая дифференцированию по пути x, также в соответствии с указаниями выше.

Но здесь подвергнуты дифференцированию оба множителя ζ, т. е. величина ζ^2, так как по сути дела при пользовании законом живых сил нужно дифференцировать выражение живой силы $^1/_2 m_1\dot{y}^2$ по ту сторону связи, т. е. без учета потерь в передачах, или живую силу как функцию от x:

$$^1/_2 m_1\dot{y}^2=^1/_2 m_1\zeta^2 u^2.$$

Эту особенность механических приводов надо твердо помнить, чтобы при составлении дифференциальных уравнений движения общими методами не впасть в ошибку в случае переменного передаточного числа $z(x)$.

Доказав справедливость формулы (213) с разных точек зрения, можно теперь вполне уверенно применять ее к расчетам автоматики, например при конструировании кулачковых шайб, профильных гребней, ускорителей в системах автоматики с коротким ходом ствола и т. д., а также к расчетам установок, например при конструировании механизмов вертикального и горизонтального наведения орудия с редукторами, плавно и непрерывно изменяющими передаточное число z (гидравлические муфты Дженни, Ойлгир и др.).

Однако существует ряд задач, в том числе и артиллерийских, решаемых при помощи уравнений еще более общего вида,

чем формула (218), которую нельзя применить, например, к движению ракеты, к полету трассирующей пули, непрерывно изменяющей массу вследствие выгорания дымообразующего состава, и т. д.

Дело в том, что в уравнении (218), которое можно представить также в виде

$$m\ddot{x} = X - \dot{x}\frac{dm}{dt}, \tag{220}$$

последний член выражает кинетическую реакцию, возникающую вследствие того, что бесконечно-малым изменяющим массам dm, непрерывно присоединяющимся к телу или отделяющимся от него, за бесконечно-малый промежуток времени dt сообщается конечное приращение скорости $\dot{x}$, а приращение скорости в данной задаче является относительной скоростью, так что абсолютная скорость бесконечно-малых масс dm в момент присоединения или отделения их равна нулю. В указанных выше задачах это может и не иметь места.

Пользуясь терминологией проф. И. В. Мещерского и вводя обозначения:

m_0 — изменяемая масса;

m_1 и m_2 — изменяющие массы;

$m = m_0 + m_1 - m_2$ — переменная масса в момент времени t;

α_1 и α_2 — абсолютные скорости в момент присоединения массы dm_1 или отделения массы dm_2,

напишем более общее уравнение движения точки переменной массы m по аналогии с уравнением (220):

$$m\ddot{x} = X + (\dot{\alpha}_1 - \dot{x})\frac{dm_1}{dt} - (\dot{\alpha}_2 - \dot{x})\frac{dm_2}{dt}. \tag{221}$$

Интересно, что вопрос о непрерывном изменении массы был впервые рассмотрен Артуром Кейли (Arthur Cayley, 1821–1895 гг.) в статье „On a class of dynamical problems“, появившейся в 1857 г., т. е. спустя 170 лет после опубликования „Начал“ Ньютона (1687 г.)

А. Кейли ставил себе задачей: определить движение тяжелой цепи, одна часть которой лежит на столе у самого края, а другая свешивается вниз и представляет движущуюся систему. В каждый элемент времени dt эта система присоединяет к себе и приводит в движение с конечным приращением скорости $\dot{\alpha}_1 - \dot{x} = -\dot{x}$ бесконечно-малую длину цепи ds с массой $dm_1 = \mu\, ds$, где μ — масса единицы длины.

Следовательно, для этого элемента dm_1 абсолютная скорость в момент присоединения его к системе равна нулю: $\dot{\alpha}_1 = 0$.

Если внизу цепь падает на плоскость, то в момент соприкосновения с плоскостью от системы как бы отделяется элемент цепи $dm_2 = \mu\, ds = dm_1$ с относительной скоростью (по отношению к движущейся системе), равной нулю: $\dot{\alpha}_2 - \dot{x} = 0$. Этот

элемент, имевший в момент отделения от системы абсолютную скорость $\dot{\alpha}_2 = \dot{x}$, далее приобретает (после прекращения связи с системой) абсолютную скорость, равную нулю, уже вследствие реакции плоскости.

Данная задача, решаемая проф. И. В. Мещерским в форме дифференциального уравнения (221), имеет некоторую аналогию с задачей о ленточном питании автоматического оружия.

Эту аналогию мы усматриваем в присоединении к движущейся ленте очередного патрона dm_1, находившегося в ящике, и в отделении каждый раз одного патрона $dm_2 = dm_1$ у приемника.

Разница с задачей А. Кейли о непрерывно движущейся цепи заключается в прерывистом движении пулеметной ленты, по крайней мере у приемника.

При этом явление усложняется, так как часть энергии теряется вследствие толчков при набегании последующих участков ленты на предшествующие в моменты остановки движения подающих органов; остановившийся участок ленты приходится вновь приводить в движение, преодолевая его инерцию; подающие органы передают пульсирующие толчки прочим частям ленты благодаря упругим ее свойствам; между отдельными звеньями имеются зазоры; сама лента получает волнообразное движение, причем образуются узловые точки и пучности в направлении, перпендикулярном ее движению, и т. д.

Однако с помощью математической модели о непрерывном движении все же возможно уяснить сущность явления и оценить до известной степени влияние присоединяющихся инертных звеньев при стрельбе очередью.

Пример. Составить уравнение движения пулеметной ленты в предположении, что она движется непрерывно и содержит в свисающей части n патронов.

Чтобы поддержать постоянной скорость ленты, надо:

1) преодолевать постоянное сопротивление, равное весу свисающей части ленты;

2) преодолевать инерцию нового патрона, находящегося в ящике и вовлекаемого в движение.

Пусть

$M = \mu H$ — масса свисающей части ленты;

H — длина свисающей части;

μ — масса единицы длины; $dm_1 = dm_2 = \mu\, dx$;

X — действующие на ленту силы;

$\dot{\alpha}_1 = 0; \quad \dot{\alpha}_2 = \dot{x}.$

Уравнение движения ленты

$$\mu H\ddot{x} = X - \mu g H - \mu\dot{x}^2$$

можно рассматривать как уравнение движения тяжелой точки в среде с сопротивлением, пропорциональным квадрату скорости, которое не зависит от длины ленты. При расстоянии между

патронами $s \approx 20$ *мм*, т. е. при числе патронов $n_1 = 50$, укладывающихся на длине 1 *м*, и при скорости движения ленты $\dot{x} = 0{,}63$ *м/сек* сопротивление равно

$$\mu \dot{x}^2 = \mu g \frac{\dot{x}^2}{g} = 50 q_1 \frac{\dot{x}^2}{g} \approx 2 q_1,$$

т. е. равно весу участка ленты, содержащего два патрона.

При большей скорострельности пулемета этот вид сопротивлений подаче сделался бы более ощутительным.

§ 37. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ УДАРА К РАСЧЕТАМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

В этом параграфе прежде всего дадим краткую сводку формул, относящихся к теории удара двух физических тел. Затем покажем, как применять эти формулы к случаям соударения физического тела с некоторой приведенной массой или соударения двух приведенных масс, и, наконец, решим несколько примеров из области автоматики.

Ударом называется взаимодействие, которое происходит при встрече двух тел, обладающих разными скоростями v_1 и v_2.

Явление удара будет протекать различно, смотря по тому, будут ли тела вполне упругие, средней упругости или вполне неупругие.

В элементарной теории обычно рассматривается соударение двух шаров при прямом или косом ударе. Положим, что ударяющиеся шары имеют массы m_1 и m_2, двигаются в одну сторону по линии, соединяющей их центры, со скоростями v_1 и v_2 до удара и получают конечные скорости u_1 и u_2 после удара; при этом допустим, что $v_1 > v_2$.

Силой удара называют суммарный импульс Q сил взаимодействия шаров за время удара τ:

$$Q = \int_0^\tau P\,dt = m_1 (v_1 - u_1); \tag{222}$$

$$-Q = -\int_0^\tau P\,dt = m_2 (v_2 - u_2). \tag{223}$$

Отсюда получаем общую теорему Ньютона:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \tag{224}$$

которая читается так: *сумма количеств движения тел до удара равна сумме количеств движения после удара.*

Далее, путем простых преобразований получаем общее выражение для силы удара:

$$Q = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} [(v_1 - v_2) + (u_2 - u_1)]. \tag{225}$$

Формула (225) для практических расчетов неудобна, так как содержит скорости u_1 и u_2 после удара, которые могут быть найдены путем эксперимента, но для проектируемой конструкции неизвестны. Поэтому их исключают из формулы при помощи некоторого множителя, зависящего от упругих свойств соударяющихся тел. Для этого сопоставляют формулу (224) с выражением „закона живых сил" при ударе вполне упругих тел и получают для этого случая зависимость:

$$u_2 - u_1 = v_1 - v_2, \tag{226}$$

которая означает, что при ударе вполне упругих тел разность скоростей после удара по абсолютной величине равна разности скоростей до удара.

Для тел средней упругости эту формулу заменяют соотношением

$$u_2 - u_1 = \varepsilon (v_1 - v_2), \tag{227}$$

показывающим, что при ударе не вполне упругих тел разность скоростей после удара не восстанавливается полностью. Множитель ε в правой части, меньший единицы, называют *коэфициентом восстановления*, который принимают равным:

для тел вполне упругих . . . . . $\varepsilon = 1$;
„ „ средней упругости . . . . . $\varepsilon < 1$;
„ „ неупругих . . . . . $\varepsilon = 0$.

Введение понятия коэфициента восстановления ε позволяет переписать формулу (225) в более удобном виде, выразив разность $(u_2 - u_1)$ через разность $(v_1 - v_2)$ и множитель ε. Таким образом, получаем общие формулы прямого центрального удара тел с любыми упругими свойствами. Сведем их в таблицу 14 (стр. 200) вместе с частными формулами при $\varepsilon = 1$ и $\varepsilon = 0$.

При $v_2 = 0$ по формуле

$$u_1 = \frac{m_1 - \varepsilon m_2}{m_1 + m_2} v_1 \tag{228}$$

можно рассчитать скорость отскока, например, бойка ударника или затвора в его заднем положении при стрельбе очередью, если в конструкции не предусмотрены специальные буфера. В этом случае обычно $m_2 \gg m_1$, так что

$$u_1 = \lim_{\frac{m_1}{m_2} \to 0} \left| \frac{\frac{m_1}{m_2} - \varepsilon}{\frac{m_1}{m_2} + 1} v_1 \right| = -\varepsilon v_1. \tag{229}$$

Формула (229) позволяет определить коэфициент восстановления ε, в точности отвечающий условиям соударения тел для того или иного частного случая; по абсолютной величине этот коэфициент равен отношению:

$$\varepsilon = \frac{u_1}{v_1}. \tag{230}$$

Таблица 14

Формулы для прямого центрального удара тел

Название величин	Неупругие тела $\varepsilon = 0$	Тела средней упругости $0 < \varepsilon < 1$	Упругие тела $\varepsilon = 1$
Сила удара Q	$\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$	$(1+\varepsilon)\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$	$2\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$
Разности скоростей до и после удара:			
$v_1 - u_1 = \frac{Q}{m_1}$	$\frac{m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$	$(1+\varepsilon)\frac{m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$	$2\frac{m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$
$u_2 - v_2 = \frac{Q}{m_2}$	$\frac{m_1}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$	$(1+\varepsilon)\frac{m_1}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$	$2\frac{m_1}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$
Скорости после удара:			
u_1	$\frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$	$\frac{(m_1 - \varepsilon m_2) v_1 + (1+\varepsilon) m_2 v_2}{m_1 + m_2}$	$\frac{(m_1 - m_2) v_1 + 2 m_2 v_2}{m_1 + m_2}$
u_2	$\frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$	$\frac{(m_2 - \varepsilon m_1) v_2 + (1+\varepsilon) m_1 v_1}{m_1 + m_2}$	$\frac{(m_2 - m_1) v_2 + 2 m_1 v_1}{m_1 + m_2}$
Скорости после удара в различных случаях и при частных значениях некоторых величин	После удара оба тела будут двигаться дальше с одинаковыми скоростями $u_1 = u_2$	При $v_2 = 0$ $u_1 = \frac{m_1 - \varepsilon m_2}{m_1 + m_2} v_1$ $u_2 = \frac{(1+\varepsilon) m_1}{m_1 + m_2} v_1$	При $m_1 = m_2$ оба тела обмениваются скоростями: $u_1 = v_2$ $u_2 = v_1$

К предыдущим формулам остается добавить формулу для живой силы, потерянной на удар не вполне упругих тел:

$$\Delta T = \frac{1}{2} m_1 (v_1^2 - u_1^2) + \frac{1}{2} m_2 (v_2^2 - u_2^2) =$$

$$= \frac{Q}{2} (v_1 + u_1) - \frac{Q}{2} (v_2 + u_2) =$$

$$= \frac{Q}{2} [(v_1 - v_2) - (u_2 - u_1)], \tag{231}$$

или

$$\Delta T = (1 - \varepsilon^2) \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2)^2 =$$

$$= \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \left[\frac{1}{2} m_1 (v_1 - u_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v_2 - u_2)^2 \right]. \tag{232}$$

Формула (232), выражающая теорему Карно, вытекает непосредственно из преобразований формулы (231) при помощи формул (227), (222) и (223).

Наконец, при косом ударе идеально гладких шаров имеем:

v_1, v_2 — скорости до удара;

α_1, α_2 — углы, составляемые скоростями с линией удара;

u_1, u_2 — скорости после удара;

β_1, β_2 — углы, составляемые скоростями с линией удара.

По предположению трение отсутствует; поэтому составляющие скоростей по направлению, перпендикулярному к линии удара, останутся без изменения:

$$u_1 \cdot \sin \beta_1 = v_1 \cdot \sin \alpha_1; \tag{233}$$

$$u_2 \cdot \sin \beta_2 = v_2 \cdot \sin \alpha_2. \tag{234}$$

Составляющие же скоростей по линии удара претерпят изменения и найдутся по формулам:

$$u_1 \cdot \cos \beta_1 = \frac{m_1 - \varepsilon m_2}{m_1 + m_2} v_1 \cdot \cos \alpha_1 + \frac{(1 + \varepsilon) m_2}{m_1 + m_2} v_2 \cdot \cos \alpha_2; \tag{235}$$

$$u_2 \cdot \cos \beta_2 = \frac{m_2 - \varepsilon m_1}{m_1 + m_2} v_2 \cdot \cos \alpha_2 + \frac{(1 + \varepsilon) m_1}{m_1 + m_2} v_1 \cdot \cos \alpha_1. \tag{236}$$

Заметим, что при ударе действуют весьма большие переменные силы P в течение очень короткого времени; такие силы называются *мгновенными*. При наличии их, т. е. при исследовании явления удара, можно пренебрегать всеми немгновенными силами.

При действии мгновенных сил можно также пренебрегать перемещениями соударяющихся тел, как величинами порядка малости τ. Однако было бы ошибочно считать эти тела неподвижными: во-первых, потому, что всякое движущееся тело про-

ходит бесконечно-малый путь в течение времени dt; во-вторых, потому, что подобного рода представления приведут к неверным результатам при решении вопроса о скользящем ударе в механизмах, например при отпирании перекашивающихся затворов и т. п.

В расчетах автоматики придется пользоваться написанными выше формулами большей частью, пожалуй, применительно к соударению не двух физических тел, а двух приведенных масс μ_1 и μ_2. На основании сказанного выше эти массы будем рассматривать как реальные массы в понимании Аппеля (см. стр. 194), определяя их значения методом редукции с учетом коэфициента отдачи η_i или при помощи коэфициентов приведения $\varphi_i = \psi_i \zeta$.

Пример 1. Найти скорость штока автоматики после удара при отпирании перекашивающегося затвора. Пусть

$M_ш$ — масса штока;

m_s — масса затвора;

α_1 — угол наклона отпирающего скоса;

α_2 — угол наклона виртуального перемещения скользящей точки M затвора при его повороте вокруг точки C.

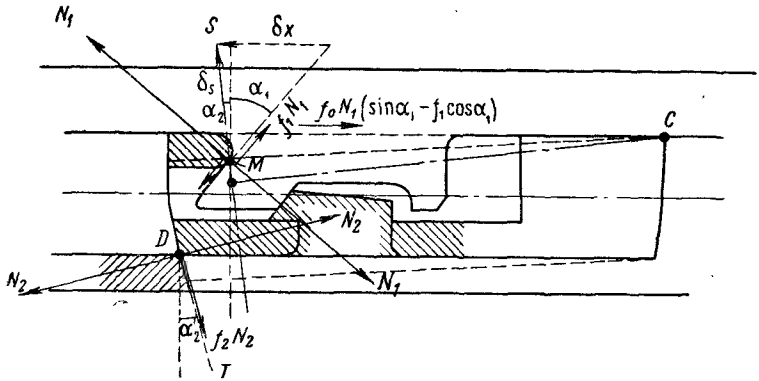


Рис. 88. Схема перекашивающегося затвора.

Полагаем (рис. 88), что нормаль N_2 в точке D боевого скоса коробки пулемета направлена в точку C и расположена под углом α_2' к продольной оси.

Для решения задачи необходимо знать момент инерции или квадрат радиуса инерции ρ_0^2 затвора при вращении его вокруг оси, проходящей через точку C.

Если деталь готовая, то можно сначала определить квадрат радиуса инерции ρ^2 двух затворов, скрепленных торцами, при помощи бифилярного подвеса.

Формула для квадрата радиуса инерции ρ_i^2 симметрично подвешенной системы [1]:

$$\rho_i^2 = \left(\frac{T_i}{4\pi}\right)^2 \frac{c_1 c_2}{H} g, \qquad (237)$$

[1] См. А. Н. Волохов, Опытное определение моментов инерции, Труды ЦАГИ, вып. 285.

где T_i — наблюдаемый период крутильных колебаний системы;
c_1 — расстояние между точками крепления нитей у подвешенной системы;
c_2 — расстояние между нитями на опоре;
$H = \sqrt{l^2 - (c_1 - c_2)^2}$ — высота подвеса;
l — длина нитей.

Чтобы получить необходимые данные для затвора, следует прокачать отдельно:

а) два затвора m_a, скрепленных цилиндриком;

б) скрепляющий цилиндрик m_b.

Влияние цилиндрика исключается по формуле:

$$\rho^2 = \frac{m_a \rho_a^2 - m_b \rho_b^2}{2m_s}. \tag{238}$$

Допустим, что для нашего случая

$$\rho^2 = 31{,}6 \ см^2.$$

Сюда внесем поправку на перенос центра вращения в точку C:

$$\rho_0^2 = \rho^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 33{,}0 \ см^2.$$

При проектировании новой системы значение ρ^2 приходится оценивать по сравнению с выполненными образцами; для этого удобно выражать ρ^2 через квадрат полной длины затвора l_s, например при наших данных $l_s = 98$ *мм*:

$$\rho^2 \approx 0{,}330\, l_s^2, \tag{239}$$

что близко к квадрату радиуса инерции однородного цилиндра.

Масса Δm, сосредоточенная в точке M, с эквивалентным моментом инерции относительно точки C равна:

$$\Delta m = m_s \left(\frac{\rho_0}{l_m}\right)^2 \approx 0{,}00985,$$

где $l_m = CM$.

Реакция боевого скоса

$$N_2 = N_1 [\cos(\alpha_1 + \alpha_2') + f_1 \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2')].$$

В дальнейшем для упрощения формул примем $\alpha_2' = \alpha_2$.

Находим коэфициент приведения сил ψ по формулам метода редукции:

$$\psi = \frac{\cos\alpha_1 + f_1 \cdot \sin\alpha_1 + f_0(\sin\alpha_1 - f_1 \cdot \cos\alpha_1)}{\sin(\alpha_1+\alpha_2) - f_1 \cdot \cos(\alpha_1+\alpha_2) - f_2[\cos(\alpha_1+\alpha_2) + f_1 \cdot \sin(\alpha_1+\alpha_2)]} \approx$$

$$\approx \frac{\cos\alpha_1}{\sin(\alpha_1+\alpha_2)} \cdot \frac{1 + (f_0+f_1)\cdot \operatorname{tg}\alpha_1}{1 - (f_2+f_1)\cdot \operatorname{ctg}(\alpha_1+\alpha_2)}. \tag{240}$$

Отсюда коэфициент приведения масс

$$\varphi = \psi \frac{\delta s}{\delta x} = \psi \frac{\cos\alpha_1}{\sin(\alpha_1+\alpha_2)}. \tag{241}$$

В момент удара принимаем $f_1 = f_2 = f_0 = 1{,}5f = 0{,}15$ и допустим, что $\alpha_1 = 40^\circ$; $\alpha_2 = 12^\circ$.

Тогда при ударе получим:

$$\varphi = 1{,}45;$$

$$\Delta m' = \varphi \Delta m = 1{,}45 \cdot 0{,}00985 = 0{,}0143. \qquad (242)$$

Считая, что конструкция отпирающих приспособлений не допускает отскока и, следовательно, $\varepsilon = 0$, найдем скорость штока после удара:

$$u' = u \frac{M_ш}{M_ш + \Delta m'}. \qquad (243)$$

С этой скоростью шток и вступит в новую фазу движения, на которой, однако, приведенная масса затвора будет уже не $\Delta m'$, а $\Delta m''$, рассчитанная по формулам (240) и (241), но с нормальными значениями $f_1 = f_2 = f_0 = f = 0{,}10$:

$$\Delta m'' = 0{,}0128 \approx 0{,}0130. \qquad (244)$$

Эти данные в дальнейшем понадобятся для систематического расчета темпа стрельбы пулемета.

Пример 2. Механизм для отражения гильз устроен в виде стебля с флажком на одном конце (см. рис. 82); на другом конце стебель в плоском сечении скручен и образует винтовую поверхность. Гайка, связанная со штоком автоматики, скользит вдоль стебля и в конце хода, ударяясь выступами в винтовую поверхность стебля, проворачивает флажок.

Найти скорость штока после удара гайки о винтовую часть стебля при следующих данных:

$m_ф = 0{,}00066$ — масса флажка;

$m_1 = 0{,}00774$ — масса стебля;

$\rho_ф^2 = 2{,}38$ *см*^{2} — квадрат радиуса инерции флажка;

$\rho_1^2 = 0{,}08$ *см*^{2} — квадрат радиуса инерции стебля;

$r = 0{,}3$ *см* — начальный радиус винтовой поверхности;

$\operatorname{tg}\theta = 0{,}262$ — тангенс угла наклона винтовой нити.

Масса флажка и стебля, приведенная к радиусу r:

$$m_ф' + m_1' = m_ф \left(\frac{\rho_ф}{r}\right)^2 + m_1 \left(\frac{\rho_1}{r}\right)^2 = 0{,}0175 + 0{,}0069 = 0{,}0244.$$

Коэфициент приведения масс при ударе:

$$f_1 = f_2 = 0{,}15; \quad \varphi = \operatorname{tg}\theta \frac{\operatorname{tg}\theta + (f_1 + f_2)}{1 - (f_1 + f_2)\operatorname{tg}\theta} = 0{,}160;$$

$$\Delta m' = \varphi (m_ф' + m_1') = 0{,}0039.$$

Скорость после удара гайки отражателя:

$$u' = u \frac{M_ш}{M_ш + \Delta m'}.$$

При дальнейшем торможенном движении во время отката штока в заднее положение:

$$f_1 = f_2 = 0{,}10; \quad \varphi = \operatorname{tg}\theta \frac{\operatorname{tg}\theta - (f_1 + f_2)}{1 + (f_1 + f_2)\operatorname{tg}\theta} = 0{,}016;$$

$$\Delta m'' = \varphi (m_\Phi' + m_1') = 0{,}0004.$$

Для случая же ускоренного движения во время наката штока в переднее положение:

$$f_1 = f_2 = 0{,}10; \quad \varphi = \operatorname{tg}\theta \frac{\operatorname{tg}\theta + (f_1 + f_2)}{1 - (f_1 + f_2)\operatorname{tg}\theta} = 0{,}128;$$

$$\Delta m''' = 0{,}128 \cdot 0{,}0244 = 0{,}0031.$$

Пример 3. Флажок отражателя, пройдя некоторый угловой путь вхолостую, встречает стреляную гильзу и отражает ее в гильзоуловитель.

Рассчитать скорость u' движения штока автоматики после удара флажка о гильзу при следующих данных:

$m_c = 0{,}0010$ — масса гильзы (cartouche);

$h = 2{,}4$ *см* — плечо удара флажка о гильзу;

$r = 0{,}3$ *см* — начальный радиус винтовой поверхности.

Масса гильзы, приведенная к радиусу r:

$$\Delta m = m_c \left(\frac{h}{r}\right)^2 = 0{,}0640.$$

Здесь при ударе гильза отражается; следовательно, удар надо рассчитывать по формуле

$$u' = \frac{m_1 - \varepsilon m_2}{m_1 + m_2} u, \tag{245}$$

где

$$m_1 = M_\text{ш} + \Delta m' = M_\text{ш} + 0{,}0039;$$

$$m_2 = \varphi \Delta m = 0{,}160 \cdot 0{,}0640 = 0{,}0103.$$

Коэфициент восстановления можно принять $\varepsilon \approx 0.30$.

Глава VII

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ СИСТЕМ ЗАПИРАНИЯ

§ 38. СИСТЕМЫ СО СВОБОДНЫМ ЗАТВОРОМ

Свободным затвором называется условно такой затвор, который в своем движении не связан со стволом никакими специальными механическими приспособлениями, кроме возвратной пружины.

Свободный затвор предназначается для того, чтобы не допустить при выстреле преждевременного выхода гильзы из патронника на сколько-нибудь значительное расстояние во избежание прорыва газов или продольного разрыва гильзы.

В данном типе автоматики возможное движение затвора назад вместе с гильзой ничем не ограничивается, поэтому все кольцевые элементы гильзы переместятся относительно патронника, и трение по боковой поверхности будет распространяться на всю длину гильзы. Кроме того, в этом случае ствол со связанными с ним частями будет увлекаться вперед. Сначала он получит импульс от переменного давления пороховых газов в период воспламенения заряда, когда снаряд еще преодолевает сопротивление пояска, врезающегося в нарезы; затем на него будет действовать реакция связи пояска с телом орудия:

$$R = \nabla p_i S_0,$$

где

$$\nabla = 0{,}02 + \frac{0{,}20}{\sqrt{d}};$$

здесь d — в *мм*.

Силами торможения для ствола, связанного со ствольной коробкой, будут силы взаимодействия ствола с затвором, согласно третьему закону Ньютона:

R_c — реакция трения боковых поверхностей гильзы о стенки патронника;

R_f — реакция трения в направляющих затвора;

F — усилие возвратной пружины, передаваемое через ствольную коробку.

Напишем диференциальные уравнения движения.

Для затвора:

$$(M + m_c)\ddot{x} = p_i S - R_c - R_f - F, \qquad (246)$$

где M — масса затвора;

m_c — масса гильзы;

S — площадь проекции всей поверхности гильзы, входящей в патронник, на плоскость, перпендикулярную его оси.

Для ствола:

а) до форсирования снаряда

$$M_0\ddot{x} = pS - R_c - R_f - F, \tag{247}$$

б) после форсирования снаряда

$$M_0\ddot{x} = \nabla p_i S_0 + p_j(S - S_0) - R_c - R_f - F; \tag{247'}$$

в) в период последействия пороховых газов

$$M_0\ddot{x} = p\,(S - S_0) - R_c - R_f - F. \tag{247''}$$

Методы расчета давлений p, p_i и p_j до момента вылета снаряда из канала орудия приведены в главе I; теперь остается показать, как построить ветвь кривой давлений в период последействия.

При расчетах автоматики удобно представлять эту ветвь показательной функцией

$$p = p_0 e^{-\frac{t}{b}}, \tag{248}$$

где b — параметр, связанный с величиной полного импульса давлений за время, теоретически равное бесконечности:

$$I = \int_0^\infty p\,dt = bp_0\left[-e^{-\frac{t}{b}}\right]_0^\infty = bp_0. \tag{248'}$$

Однако последняя формула показывает, что практически можно ограничить время пятью параметрами с погрешностью 0,6%, принимая $\tau = 5b$.

Величину полного импульса давлений определяют опытным путем или теоретически по наибольшей *скорости свободного отката*, которую выражают формулой

$$W_{max} = \frac{q + \beta\omega}{Q_0} v_0,$$

по своей структуре сходной с формулой для скорости отката в момент прохождения пулей или снарядом дульного среза:

$$W_0 = \frac{q + 0{,}5\omega}{Q_0 + 0{,}5\omega}\, v_0 \approx \frac{q + 0{,}5\omega}{Q_0}\, v_0.$$

Тогда импульс давления за время τ можно представить через приращение количества движения системы в таком виде:

$$I_\tau = \frac{Q_0}{g}\,(W_{max} - W_0) = (\beta - 0{,}50)\,\frac{\omega}{g}\,v_0. \tag{249}$$

Основываясь на исследовании В. Е. Слухоцкого, определим величину β, называемую *коэфициентом действия пороховых газов*, по формуле

$$\beta = \frac{B_0}{v_0}\sqrt{p_0 g\left(\frac{w_0}{\omega} - \alpha\right)}, \tag{250}$$

где v_0 — начальная скорость в *м/сек*;
p_0 — дульное давление в *кг/м*^{2};
$w_0 = w_a + S_0 l_0$ — объем заснарядного пространства в момент t_0 в *м*^{3};
ω — вес заряда в *кг*;
α — 0,001 *м*^{3}/*кг* — коволюм пороховых газов;
$g = 9{,}81$ *м/сек*^{2} — ускорение силы тяжести;
B_0 — постоянный коэфициент, зависящий от коэфициента k политропы расширения и определяемый по таблице:

$$B_0 = \frac{2{,}83}{\sqrt{k(k+1)}}$$

k	B_0
1,20	1,74
1,25	1,69
1,30	1,63
1,35	1,59
1,40	1,54

Для практических приложений перепишем формулу (250), изменив размерность входящих в нее величин:

$$\beta = \frac{B_0}{v_0}\sqrt{98{,}1\, p_0\left(\frac{w_0}{\omega} - \alpha\right)}, \tag{250'}$$

где v_0 — в *м/сек*; p_0 — в *кг/см*^{2}; w_0 — в *см*^{3}; ω — в *г*; $\alpha = 0{,}98 \approx$ ≈ 1 *см*^{3}/*г*; g — в *дм/сек*^{2}.

В уравнениях (246) — (247″) можно пренебрегать последними двумя силами R_f и F в течение всего времени действия пороховых газов.

Движение затвора будет возможным при условии $p_j S > R_c$ и при достаточно прочной гильзе.

Для системы автоматики со свободным затвором сама возможность неограниченного движения затвора в период действия пороховых газов уже указывает на то, что форму гильзы желательно иметь цилиндрической или с очень малой конусностью, иначе при извлечении ее из патронника будут прорываться газы через образующийся кольцевой зазор.

Поэтому сюда целиком относятся выводы § 26, указывающие предельно допустимую длину цилиндрической гильзы при однородной толщине ее стенок δ

$$l' \leqslant \frac{d}{4f}$$

и максимальные напряжения у ее дна

$$\sigma_{max} = \frac{pd}{4\delta}.$$

Из формулы для l' следует, что при $f = 0{,}10$ длина цилиндрической гильзы однородной толщины может быть не более 2,5 калибра. Такой патрон вмещал бы очень малый заряд пороха: $\frac{\omega}{q} \approx 0{,}150$ для современного снаряда весом $q = 18d^3$.

Отсюда видно, что свободный затвор может найти применение в оружии с небольшим давлением пороховых газов и с коротким цилиндрическим патроном, т. е. в оружии малой мощности (оружие самообороны).

Увеличение заряда было бы возможно при утолщении стенок гильзы у дна, а также при смазке патронов для понижения коэфициента трения f, что способствует устранению причин заклинивания гильзы в патроннике и уменьшает опасность поперечного ее разрыва. Из других мер, обеспечивающих безопасное экстрактирование гильзы, следует отметить устройство канавок Ревелли (см. рис. 18).

При устройстве автоматики со свободным затвором надо еще позаботиться о том, чтобы гильза не успела значительно выйти из патронника, пока давление пороховых газов не упадет до предела, исключающего возможность продольного разрыва гильзы. Для этого служит достаточно массивный затвор, что подтверждается также следующими расчетами.

Рассчитав на основании балистических данных значения импульсов давления пороховых газов на поверхность гильзы I_a, I_0 и I_τ и зная времена t_a, t_0 и τ, зададимся единичной массой затвора $m_1 = 1$. Отсюда найдем приращения скорости на отдельных участках по формуле

$$\Delta u' = \frac{I}{m_1} = I \text{ (по численному значению).}$$

Затем определим скорости

$$u_i' = \sum_0 \Delta u'.$$

Перемещения рассчитаем по формуле проф. Бравина:

$$\Delta\xi' = \left[u_i' + \vartheta(n, m)\frac{\Delta u'}{2}\right]\Delta t, \qquad (251)$$

где $\vartheta(n, m)$ — модуль действующей нагрузки, легко определяемый по виду кривой $p(t)$, на участках воспламенения заряда и последействия:

$$\vartheta(n, m\ldots) \approx \frac{2a}{t_a} = 0{,}40 \text{ при } t_a = 5a; \qquad (252)$$

$$\vartheta(n, m. .) \approx 2\left(1 - \frac{b}{\tau}\right) = 1{,}60 \text{ при } \tau = 5b, \tag{253}$$

а на основном участке диаграммы равный:

$$\vartheta(n, m) = \frac{2x_0}{t_0 v_0}. \tag{254}$$

Если известен коэфициент относительного уменьшения силы действия пороховых газов из-за трения гильзы $k < 1$, то требуемую массу находят по формуле

$$M = m_1 \frac{\xi'}{\Delta l} k. \tag{255}$$

Допустим, что для 7,62-*мм* пулемета имеются указанные выше данные. Вписываем их в первые две графы таблицы 15, а в остальных проведем расчет скоростей и перемещений для единичной массы $m_1 = 1$.

Таблица 15

$\Delta t \cdot 10^3$	$t \cdot 10^3$	$\Delta u'$ *м/сек*	u' *м/сек*	$\vartheta(n, m)$	$\frac{\vartheta}{2}\Delta u$ *м/сек*	$\frac{\vartheta}{2}\Delta u + u'_i$ *м/сек*	$\Delta\xi'$ *мм*	ξ' *мм*
0,74	0	0,019	0	0,40	0,004	0,004	0,003	0
1,30	0,74	0,928	0,019	1,04	0,482	0,501	0,651	0,003
3,75	2,04	0,296	0,947	1,60	0,237	1,184	4,450	0,654
—	5,79	—	1,243	—	—	—	—	5,104

Диаграмма путей свободного отката затвора ξ' и ветвь кривой давления $p(t)$ в период последействия газов представлены на рис. 89.

Допустим, что желательно осуществить выход гильзы из патронника на $\Delta l = 2{,}5$ *мм* при давлении $p(t) = 400$ *ат*, чему соответствует $\xi' \approx 1$ *мм*.

Тогда потребовалась бы масса затвора

$$M \approx \frac{\xi'}{\Delta l} = 0{,}4$$

и вес затвора

$$G = Mg \approx 4 \text{ кг} = 4000 \text{ г} = 9100 d^3,$$

что составляет около половины веса всего пулемета.

Этот расчет показывает, что в системах со свободным затвором его вес получается чрезвычайно большим, неприемлемым для оружия большой мощности. На основании предыдущего приходим к заключению, что масса и вес затвора в этих системах зависят главным образом от балистики оружия.

В нашем примере скорость затвора определяется по формуле

$$u_0 = ku' \frac{m_1}{M} \approx u' \frac{m_1}{M} = \frac{1{,}243}{0{,}4} = 3{,}12 \text{ м/сек}.$$

Найдя живую силу

$$\frac{Mu_0^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(ku_0' m_1)^2}{M} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(ku_0')^2}{M} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{u_0'^2}{M} = 12{,}1 \text{ кгм}$$

и задаваясь длиной хода затвора

$$l \approx 100 \text{ мм} = 0{,}10 \text{ м},$$

определим усилие возвратной пружины в предположении, что начальное ее поджатие равно половине максимального сжатия:

$$1{,}5F_0 l \leqslant 2\left(\frac{Mu_0^2}{2}\right) = 24{,}2; \qquad (256)$$

$$F_0 = \frac{24{,}2}{0{,}15} \approx 162 \text{ кг}.$$

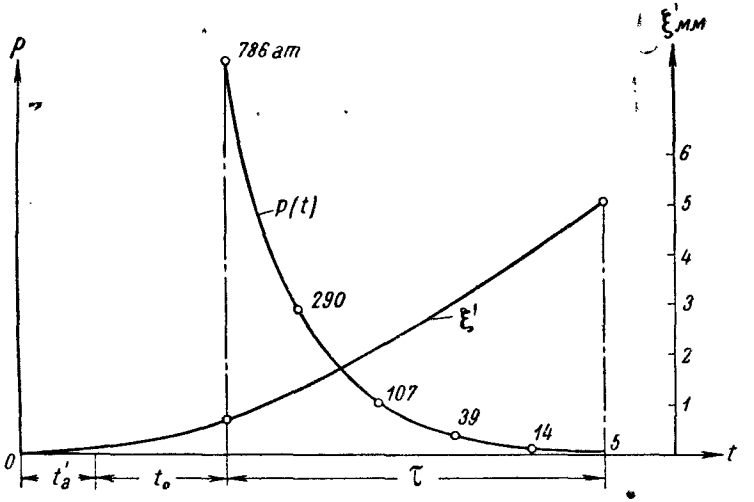


Рис. 89. Диаграмма пути свободного отката затвора:
t_a' — промежуток времени до форсирования снаряда; t_0 — время прохождения снарядом канала ствола; τ — время последействия; ξ' — путь свободного отката затвора единичной массы.

При этом не принимаем во внимание работу механизмов подачи, считая, например, подачу магазинной, и пренебрегаем остальными малыми потерями энергии.

Время отхода затвора назад рассчитываем приближенно по модулю с одним обращенным параметром:

$$\nu = \frac{F_0}{F_1} = 0{,}500;$$

$$\theta(\nu) = 1{,}11;$$

отсюда, преобразуя формулу (251), имеем:

$$t_1 = \frac{2\Delta x}{u_0 \theta(\nu)} = \frac{0{,}200}{3{,}12 \cdot 1{,}11} = 0{,}058 \text{ сек.} \qquad (257)$$

Время полного цикла

$$T = t_a + 2t_1 = 0{,}00074 + 0{,}116 \approx 0{,}117 \text{ сек.}$$

Предельная скорострельность получается равной

$$n = \frac{60}{T} = \frac{60}{0{,}117} \approx 510 \text{ выстрелов в минуту,}$$

т. е. очень низкая для современного пулемета.

§ 39. СИСТЕМЫ С НЕСВОБОДНЫМ ЗАТВОРОМ

Весьма значительный вес затвора в системах первой группы типа „А" (по классификации), увеличивающий общий вес оружия, заставил конструкторов найти средство для кажущегося увеличения массы затвора в начале отката устройством различного рода механических приспособлений, например тормозные вкладыши в системе Томсона, коленчатые рычаги в системе Шварцлозе и т. д.

При расчете отката такого затвора нужно пользоваться методом редукции масс и моментов инерции. Пусть с основной массой затвора m_1 механически связана некоторая масса m_2. Задавшись кинематическими связями, а следовательно, и передаточным числом, определяемым соотношением между перемещениями s_1 массы m_1 и s_2 массы m_2:

$$z_1 = \frac{\delta s_1}{\delta s_2},$$

а также назначая коэфициент полезного действия передачи η_1, будем рассматривать совместное движение обеих масс как движение основной массы m_1 с присоединенной массой

$$\Delta m = \frac{m_2}{\eta_1 z_1^2}.$$

А. ЗАТВОРЫ ПЕРВОГО КЛАССА, ПЕРВОЙ ГРУППЫ, ТИПА „Б"

Применим полученные формулы к простейшей механической системе Томсона. На рис. 90 сплошной линией показан наклонный паз на одной из боковых стенок ствольной коробки. В этот паз входит ромбовидный выступ, имеющийся с боков у вкладыша. Форма вкладыша представляет собой как бы скобу или вилку, охватывающую затвор и скользящую по пазу затвора, показанному пунктиром.

Пусть:

$m_1 = 0{,}0245$ *кг сек*^{2}/*м* — масса затвора;

$m_2 = 0{,}0050$ *кг сек*^{2}/*м* — масса вкладыша;
$\alpha_1 = 65°$ — наклон паза в затворе;
$\alpha_2 = 45°$ — наклон паза в коробке;
$f = 0{,}15$ — коэфициент трения стали по бронзе при высоких удельных давлениях (вдвое выше нормального).

По рис. 90 находим соотношение между перемещениями x и y затвора и вкладыша:

$$z_1 = \frac{\delta x}{\delta y} = \frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin \alpha_1}. \qquad (258)$$

Уравнение работ на перемещениях δx и δy напишем в виде:

$$\delta y\, Y = \delta y N_1 \{\sin(\alpha_1 - \alpha_2) - f \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - f[\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + f \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2)]\} = \eta_1 \delta x X = \eta_1 \delta x N_1 [\sin \alpha_1 - f \cdot \cos \alpha_1 + f(\cos \alpha_1 + f \cdot \sin \alpha_1)].$$

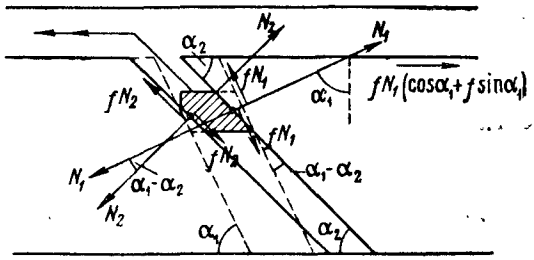


Рис. 90. Система запирания затвора вкладышем в пистолете-пулемете Томсона.

Отбрасывая члены с квадратами коэфициента трения, получим:

$$\eta_{l1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \cdot \frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_2) - 2f \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin \alpha_1} = 1 - 2f \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_1 - \alpha_2). \qquad (259)$$

В нашем случае

$$\sin(\alpha_1 - \alpha_2) = \sin 20° = 0{,}342;$$
$$\sin \alpha_1 = \sin 65° = 0{,}906; \quad z_1 = 0{,}378;$$
$$\operatorname{ctg}(\alpha_1 - \alpha_2) = \operatorname{ctg} 20° = 2{,}75;$$
$$2f \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_1 - \alpha_2) = 0{,}825; \quad \eta_{l1} = 0{,}175.$$

По формуле

$$\Delta m = \frac{m_2}{\eta_{l1} z_1^2} = 40\, m_2 = 0{,}200.$$

Следовательно, масса вкладыша m_2, составляющая всего лишь 20% от массы m_1 затвора, присоединяясь к движению особым механизмом, превращается в редуцированную массу Δm,

в 8 раз превышающую массу затвора. Так что при движении затвора вместо действительных масс m_1 и m_2 необходимо учитывать как бы утяжеленную кажущуюся, или фиктивную, массу, равную

$$m_e = m_1 + \Delta m = 0{,}0245 + 0{,}200 = 0{,}2245,$$

в качестве *расчетного эквивалента* до тех пор, пока вкладыш, поднявшись на высоту h и совершив путь

$$y = \frac{h}{\sin \alpha_2}, \tag{260}$$

не выйдет из своего наклонного паза и не вступит в продольный паз короба.

За это же самое время затвор пройдет путь

$$x = yz_1 = \frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2} h = 0{,}534h, \tag{261}$$

после чего данный механизм, сыграв свою важную роль в замедлении движения затвора, перестанет функционировать, а масса затвора обратится в сумму весовых масс:

$$m_1' = m_1 + m_2 = 0{,}0295.$$

Вот какого эффекта мы достигли благодаря механическому приспособлению[1].

Проведенный расчет показывает, что в системе Томсона вкладыш замедляет движение затвора[2], а не задерживает его, так как в последнем случае при заданных углах α_1 и α_2 следовало бы считать коэфициент трения $f = 0{,}182$, что мало вероятно для скольжения бронзы по стали, да еще при наличии смазки. По этим соображениям система Томсона отнесена к первому классу группы I, тип „Б".

В только что разобранном примере передаточное число $z_1 = \text{const}$. Теперь рассмотрим движение затвора при переменном передаточном числе, которое является обычно функцией пути:

$$z = z(x),$$

например в системе Шварцлозе и др.

Если затвор состоит из совокупности деталей автоматики, принимающих участие в движении, а именно:

1) из частей, обладающих массами m_i, движущимися поступательно со скоростями u_i;

2) из частей, обладающих моментами инерции I_k и имеющих вращательное движение с угловой скоростью ω_k, то в этом

---

[1] Недаром механика получила свое название от греческих слов: μηχανικός — изобретательный; μηχανάω — искусно строю, употребляю все хитрости в построении чего-нибудь.

[2] См. § 9, первая группа, тип «Б», п. 3, а также примечание (там же).

случае также нужно воспользоваться методом редукции, учитывая, что вообще передаточные числа z_i — переменные величины.

Обозначая массу и скорость основного звена через m и u, можно установить из рассмотрения кинематических связей передаточные числа и коэфициенты полезного действия:

$$z_i = \frac{u}{u_i} \text{ и } \eta_i.$$

Тогда редуцированные массы от поступательно движущихся частей, учитываемые на направлении движения основной массы m, определятся так:

$$\mu_i = \frac{m_i}{\eta_i z_i^2} = \frac{m_i}{\eta_i z_i} \zeta_i, \tag{262}$$

где

$$\zeta_i = \frac{1}{z_i}.$$

Редуцированные массы от вращающихся частей найдутся подобным же приемом, если ввести обозначение r_k — мгновенного радиуса и v_k — мгновенной скорости движения точки, принадлежащей вращающейся детали и соприкасающейся с некоторой точкой основного звена:

$$m_k = \frac{I_k}{r_k^2}; \quad z_k = \frac{u}{v_k};$$

$$\mu_k = \frac{m_k}{\eta_k z_k^2} = \frac{m_k}{\eta_k z_k} \zeta_k, \tag{263}$$

где

$$\zeta_k = \frac{1}{z_k}.$$

Диференциальное уравнение движения затвора теперь напишется в виде:

$$(m + \mu_i + \mu_k)\ddot{x} = P(t) - \frac{m_i}{\eta_i z_i} \dot{x}^2 \frac{d\zeta_i}{dx} - \frac{m_k}{\eta_k z_k} \dot{x}^2 \frac{d\zeta_k}{dx} -$$

$$- \frac{F_i}{\eta_i z_i} - \frac{M_k}{\eta_k z_k} \cdot \frac{1}{r_k} - F(x) - R_c, \tag{264}$$

где F_i — сила сопротивления, действующая на направлении движения i-го звена.

M_k — момент действующих сил сопротивления относительно оси вращения k-го звена.

Выражение (264) пишем именно в форме диференциального уравнения, а не уравнения работ, имея в виду, что сюда могут входить силы, зависящие от времени, например $P(t)$, наравне

с силами, зависящими от пути, например $F(x)$. Если было бы написано уравнение работ, то трудно было бы выразить силу $P(t)$ через путь x, который сам является решением не решенного еще дифференциального уравнения (264).

При постоянных числах ζ_i и ζ_k второй и третий члены в уравнении (264) пропадают.

Уравнение вида (264) чаще всего придется решать приемами численного интегрирования дифференциальных уравнений, вычертив предварительно графики функций ζ и их производных и выровняв, в особенности последние, на тех участках, где можно считать эти функции непрерывными, если только они не заданы аналитическими выражениями.

Преимущество несвободных затворов с редуцированной массой, присоединяемой механическими приспособлениями на все время действия высоких давлений, перед свободными затворами заключается в меньшем весе системы. Однако они весьма чувствительны к довольно изменчивым значениям коэфициента трения f. При этих затворах также не устраняется опасность поперечного разрыва гильзы, как и при свободном затворе.

Б. ЗАТВОРЫ С ПОЛНОЙ ЗАДЕРЖКОЙ ОТКАТА

Эти затворы предназначены для полной задержки отката при высоких давлениях пороховых газов. Отпираются они специальными приспособлениями, например:

а) отводом газа, действующего на запирающее устройство [поворотный золотничок в системе Скотти (Scotti), запираемый стопором штока];

б) проворотом ствола (в системе пистолета Сэвэдж) в результате реактивного момента, возникающего при движении снаряда по нарезной части канала и выражаемого формулой (23):

$$M = \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \chi \frac{rP_i}{1+\nabla} \operatorname{tg}\theta;$$

в) подвижным надульником и тягой; эти системы, вследствие сложности и громоздкости, не получили распространения.

Отметим некоторые особенности в решении задачи внутренней балистики при свободном и несвободном затворе. В этом случае придется вместо пути снаряда ввести путь $l+s$, где

$$s = x\frac{S_1}{S_0};$$

S_1 можно считать площадью наибольшего поперечного сечения гильзы, а x — путь затвора. Однако эта поправка не столь существенна.

§ 40. РАСЧЕТ ДЕЙСТВИЯ АВТОМАТИКИ ПУШКИ „ЭРЛИКОН“

Общий ход расчета действия автоматики покажем на численном примере.

Исходные данные системы:

$d = 20{,}1$ *мм* — калибр;

$S_0 = 3{,}22$ *см*^{2} — площадь живого сечения канала с учетом нарезов;

$w_a = 35{,}2$ *см*^{2} — объем зарядной каморы;

$L_0 = 1090$ *мм* — длина нарезной части канала ствола;

$\Delta L = 10$ *мм* — длина запоясковой части снаряда;

$l_0 = L_0 + \Delta L = 1100$ *мм* — полный путь снаряда в канале ствола;

$N \approx 30$ — ход нарезов в калибрах;

$q = 0{,}142$ *кг* — вес снаряда $\left(c_q = \frac{q}{d^3} = 17{,}5\right)$;

$\omega = 0{,}020$ *кг* — вес заряда; $\frac{\omega}{q} = 0{,}141$;

$p_{max} = 3000$ *ат* — наибольшее баллистическое давление;

$v_0 = 670$ *м/сек* — начальная скорость снаряда;

$\Delta = \frac{\omega}{w_a} = 0{,}57$ — плотность заряжания;

$l_1 = \frac{w_a}{S_0} = 109$ *мм* — приведенная длина каморы;

$\lambda_0 = \frac{l_0}{l_1} = 10$, — полный путь снаряда в долях l_1.

Задачу внутренней балистики решаем по способу проф. Н. Ф. Дроздова, пользуясь таблицами АНИИ, изд. 1933 г., с соответствующим исправлением чисел времен.

Коэфициент влияния нарезов принимаем $\nabla = 0{,}09$, чтобы согласовать величину начальной скорости v_0 с опытным ее значением.

Вследствие особенностей системы свободного затвора с выкатом коэфициент взаимодействия масс полагаем $\chi = 1$.

Переходные коэфициенты определяем по формулам:

$$k_b = \frac{p}{p_i} = 1 + \frac{0{,}333}{1 + \nabla} \cdot \frac{\omega}{q} \cdot \frac{1}{\chi} = 1{,}04;$$

$$k_j = \frac{p_j}{p_i} = 1 + \frac{0{,}500}{1 + \nabla} \cdot \frac{\omega}{q} (2 - \chi) = 1{,}065.$$

Коэфициент фиктивности

$$\varphi_r = \frac{1 + \nabla}{\chi} k_b = 1{,}135.$$

Коэфициенты для пересчета табличных скоростей и времен:

$$\nu_v' = \frac{v}{v_{\text{табл}}} = \frac{1}{\chi}\sqrt{\frac{\omega}{q}} \cdot \sqrt{\frac{1{,}05}{\varphi_r}} = 0{,}361;$$

$$\nu_t' = \frac{t}{t_{\text{табл}}} = 10^{-5}\frac{l_1}{\nu_v'\chi} = 0{,}302 \cdot 10^{-5}.$$

Решению балистической задачи отвечает параметр заряжания

$$B_0 = 1{,}364.$$

Кроме основной ветви кривой давления, для системы автоматики „Эрликон" необходимо рассчитать еще добавочные ветви воспламенения заряда и последействия пороховых газов.

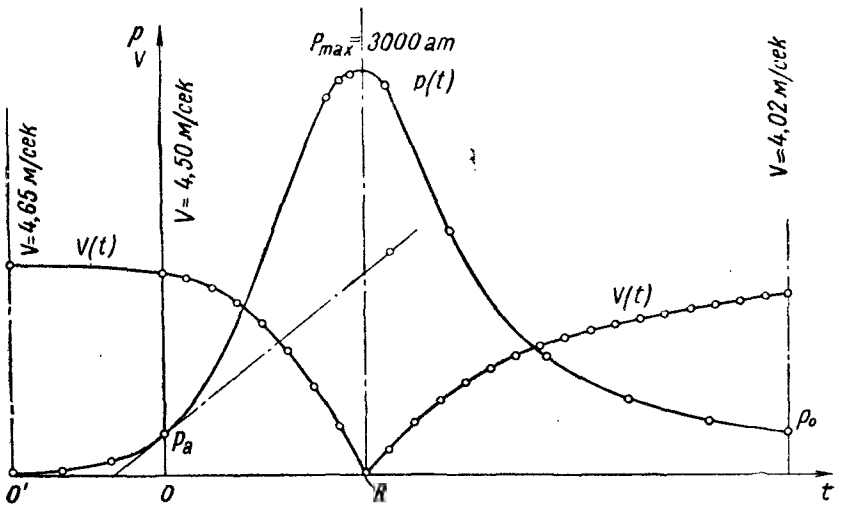


Рис. 91. Диаграмма работы затвора в автоматической пушке „Эрликон".

Ветвь воспламенения заряда. По плотности заряжания находим из таблиц АНИИ значения:

$$\zeta_a = 0{,}0335,$$

$$\psi_a = 0{,}0353.$$

Производная давления по времени в момент форсирования снаряда:

$$D_a = \left(\frac{dp}{dt_{\text{табл}}}\right)_{t=0} = 0{,}975\frac{N_a}{\sqrt{B}} = 0{,}975\frac{4{,}86}{1{,}17} = 4{,}06;$$

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{t=0} = \frac{D_a}{\nu_t'} = 1345 \cdot 10^3 \ am/сек,$$

где N_a берется по таблице приложения 1.

Ветвь воспламенения построим по показательной функции $p = p_a e^{-\frac{t'}{a}}$, где t' — время, отсчитываемое в отрицательную сторону оси времени, приравнивая значения производных в момент времени $t = 0$:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{t=0} = -\frac{p_a}{a} = -\frac{D_a}{\nu_t'}.$$

Отсюда получаем значение параметра

$$a = \nu_t' \frac{p_a}{D_a} = 0{,}302 \cdot 10^{-5} \frac{300}{4{,}06} = 0{,}223 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Полный импульс этого давления на единицу площади от $t' = 0$ до $t' = \infty$

$$i_a = \int_0^\infty p\, dt' = a p_a = 0{,}067 \ \textit{кг сек/см}^2.$$

Почти та же величина импульса получается и по формуле внутренней балистики при ω и q в граммах:

$$i_a' = \int_0^{t_a} p\, dt = \frac{e_a}{u_1} = 0{,}0984 \frac{\zeta_a}{S_0} \sqrt{B \varphi_r \omega q};$$

$$i_a' = 0{,}068 \ \textit{кг сек/см}^2.$$

Время воспламенения заряда ограничим тремя параметрами a:

$$t_a = 3a \approx 0{,}67 \cdot 10^{-3} \text{ сек.},$$

что соответствует инициирующему давлению воспламенителя

$$p_0' = p_a e^{-3} = 15 \ \textit{ат}$$

с потерей импульса на 5% из-за укорочения ветви давления, уходящей в бесконечность.

Таким образом, получаем:

$$t_a = 0{,}67 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$

$$i_a = 0{,}95 \cdot 0{,}067 \approx 0{,}064 \ \textit{кг сек/см}^2.$$

Участок последействия пороховых газов. Коэфициент действия пороховых газов β определяем по формуле В. Е. Слухоцкого, зная объем заснарядного пространства

$$w_0 = w_a + S_0 l_0 = 35{,}2 + 354{,}2 \approx 390 \ \textit{см}^3$$

и принимая $B_0 = 1{,}63$, что отвечает коэфициенту политропы $k = 1{,}30$. Тогда

$$\beta = \frac{B_0}{v_0} \sqrt{98{,}1\, p_0 \left(\frac{w_0}{\omega} - \alpha\right)} = 1{,}84, \qquad (265)$$

и параметр кривой давления, выражаемой показательной функцией

$$p = p_0 e^{-\frac{t}{b}}, \tag{266}$$

равен:

$$b = (\beta - 0{,}50)\ \frac{\omega}{g} \cdot \frac{v_0}{p_0 S_0} = 1{,}80 \cdot 10^{-3}\ \text{сек}. \tag{267}$$

Время последействия будем ограничивать моментом выхода цилиндрической части гильзы из патронника или будем считать его равным пяти параметрам:

$$\tau \leqslant 5b \leqslant 0{,}009\ \text{сек}.$$

Импульс давления на единицу площади за время последействия равен:

$$i_b \leqslant bp_0 \leqslant 0{,}0018 \cdot 315 \leqslant 0{,}567\ \textit{кг сек/см}^2.$$

Для упрощения расчетов можно иногда закон изменения давления в период последействия заменять линейным законом равного импульса (по Валье):

$$i_b = bp_0 = \frac{1}{2}\tau_1 p_0,$$

приняв

$$\tau_1 = 2b = 3{,}60 \cdot 10^{-3}\ \text{сек.},$$

если только в начале этого периода имеется сколько-нибудь значительная скорость движения, что и принято далее.

Этот прием оправдывается замечаниями, сделанными в § 5 главы I относительно роли модуля нагрузки, отражающего закон ее изменения во времени, при наличии большого значения скорости в начале рассматриваемого участка.

Ввиду того что расчет участка последействия является приближенным и истечение пороховых газов происходит при переменном весе газа, здесь не будем вводить коэфициенты перехода к давлению на дно канала ствола. Импульс давления на единицу площади у дна канала для основной части диаграммы найдем по формуле:

$$i_0 = (1 + \nabla)\frac{mv_0}{S_0} k_f = 1{,}09\ \frac{0{,}142}{9{,}81} \cdot \frac{670}{3{,}22}\ 1{,}065 = 3{,}5\ \textit{кг сек/см}^2,$$

причем время действия этого импульса

$$t_0 = 2{,}74 \cdot 10^{-3}\ \text{сек.},$$

а среднее давление

$$(p_f)'_{\text{med}} = 1280\ \textit{am}.$$

Окончательно получаем значения полного импульса:

$$i_a = 0{,}064 \ \ кг\,сек/см^2; \ t_a = 0{,}67 \cdot 10^{-3} \ \text{сек.}$$
$$i_0 = 3{,}500 \ \ кг\,сек/см^2; \ t_0 = 2{,}74 \cdot 10^{-3} \ \text{сек.}$$
$$i_b = 0{,}567 \ \ кг\,сек/см^2; \ \tau_1 = 3{,}60 \cdot 10^{-3} \ \text{сек.}$$
$$\Sigma i = 4{,}131 \ \ кг\,сек/см^2; \ \Sigma t = 7{,}01 \cdot 10^{-3} \ \text{сек.}$$

В этой системе затвор перед выстрелом находится на боевом взводе в заднем положении при сжатой возвратной пружине. После спуска он устремляется вперед вместе с патроном и приобретает некоторое количество движения $M'V_0$ к моменту накола капсюля, когда передняя поверхность затвора находится еще в расстоянии 11,5 *мм* от среза пенька ствола.

С момента воспламенения заряда пороховые газы начинают действовать сначала на дно гильзы с силой pS_0', а затем, по выходе снаряда из патрона, — на площадь S_0'' с силой pS_0'', где S_0' — площадь дна снаряда;

S_0'' — площадь, равная проекции поверхности всей гильзы на плоскость, перпендикулярную к ее оси.

Ввиду незначительной разницы между величинами S_0', S_0'' и S_0 введем в расчеты величину

$$S_0'' = \frac{\pi}{4} 2{,}10^2 = 3{,}45 \ см^2.$$

Таким образом, значение полного импульса будет:

$$I_0 = S_0'' \Sigma i = 14{,}25 \ \ кг\,сек.$$

Кроме этой силы, возникнут также силы трения на боковой поверхности гильзы $R_f = fS_1p$, где под S_1 будем подразумевать условно не всю боковую поверхность, а только часть ее, исключая поверхность донной части, обладающей более толстыми стенками.

Суммарная сила

$$pS_0'' + fpS_1 = pS_0'' \left(1 + f \frac{S_1}{S_0''}\right) = pS_0''(1 + \varepsilon) \qquad (268)$$

вызовет замедленное движение затвора вплоть до его остановки в некоторой *точке возврата*, где движение изменит знак. После этого затвор начнет откидываться назад силой

$$pS_0'' - fpS_1 = pS_0''(1 - \varepsilon). \qquad (269)$$

Силами возвратной пружины и трения в период действия пороховых газов можно пренебречь, так как влияние этих факторов ничтожно по сравнению с силами давления пороховых газов. К моменту времени τ_1 система затвор — стреляная гильза приобретает количество движения $M''V_1$. Для упрощения расчета примем среднее значение веса затвора

$$Q = Mg = 13{,}2 + \frac{1}{3} \text{ веса пружины} = 13{,}7 \ кг \approx 1700 \, d^3.$$

Теперь можно выразить общий импульс $I_0 = S_0'' \Sigma i$ в форме двух слагаемых A и B, на которые разбивается вся диаграмма давлений точкой возврата R (рис. 91):

$$S_0'' \Sigma i = I_0 = A + B, \tag{270}$$

причем, очевидно,

$$MV_0 = A(1 + \varepsilon); \qquad A = \frac{MV_0}{1 + \varepsilon};$$

$$MV_1 = B(1 - \varepsilon); \qquad B = \frac{MV_1}{1 - \varepsilon}.$$

Отсюда

$$\frac{MV_0}{1 + \varepsilon} + \frac{MV_1}{1 - \varepsilon} = I_0, \tag{271}$$

или иначе

$$I_0 \varepsilon^2 + (MV_1 - MV_0)\varepsilon - [I_0 - (MV_1 + MV_0)] = 0. \tag{272}$$

Таким образом, значение ε связано с величинами I_0, MV_1 и MV_0 квадратным уравнением вида:

$$a\varepsilon^2 + b\varepsilon + c = 0,$$

где $a = I_0$;
$b = MV_1 - MV_0$;
$c = -[I_0 - (MV_1 + MV_0)]$.

Решение этого уравнения

$$\varepsilon = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

имеет смысл только при знаке плюс перед корнем, так как величина b должна быть положительной, т. е.

$$b = MV_1 - MV_0 \geqslant 0.$$

Кроме того, чтобы решение было вещественным, необходимо выполнить условие:

$$I_0 \geqslant MV_1 + MV_0. \tag{273}$$

Условие $MV_1 - MV_0 > 0$ говорит о том, что количество движения назад MV_1, сообщаемое системе, должно быть (процентов на 10) больше количества движения системы вперед MV_0, чтобы затвор заскочил надежно за боевой взвод. Положительная разность $MV_1 - MV_0$ при горизонтальном положении оружия обеспечивает также работу системы на углах снижения; при углах же возвышения это условие удовлетворяется само собой. В идеальном случае

$$MV_1 = MV_0.$$

В приведенном примере для системы „Эрликон“ путь затвора от спуска до воспламенения заряда

$$x_1 = 226 - 11{,}5 = 214{,}5 \text{ мм}.$$

Усилие пружины

$$F_1 = 115 \ кг \text{ при } x_1 = 214{,}5 \ мм$$
$$F_0 = 28{,}5 \ „ \ „ \quad x = 0$$
$$\Delta F = 86{,}5 \ кг \text{ при } \Delta x = 214{,}5 \ мм$$

Жесткость пружины

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{86{,}5}{214{,}5} = 0{,}403 \ кг/мм;$$

отсюда

$$f_1 = 286 \ мм; \quad f_0 = 70{,}8 \ мм.$$

Учитывая трение затвора в направляющих величиной $R_f' = 1{,}5 \ кг$, определим скорость в момент накола капсюля по формуле

$$V_0 = \sqrt{\frac{2g}{Q}\left(\frac{F_1 + F_0}{2} - R_f'\right)\Delta x} =$$

$$= \sqrt{\frac{2g}{Q}\left[\frac{k}{2}(f_1 + f_0) - R_f'\right](f_1 - f_0)} = 4{,}65 \ м/сек; \qquad (274)$$

$$MV_0 = \frac{Q}{g}V_0 = \frac{13{,}7}{9{,}81}4{,}65 = 6{,}50 \ кг\,сек.$$

Формулами (273) и (274) при некотором их упрощении можно воспользоваться для ориентировочного подсчета усилия пружины, а именно:

$$I_0 \approx 2{,}20MV_0, \text{ т. е. больше } 2{,}10MV_0;$$

$$MV_0^2 = (F_1 + F_0)\Delta x \approx 1{,}25F_1\Delta x.$$

Принимая несколько заниженный коэфициент трения гильзы $f = 0{,}02$ с учетом упругого действия ее стенок и полагая $S_1 = 35 \ см^2$, найдем:

$$\varepsilon = f\frac{S_1}{S_0} = 0{,}02\,\frac{35}{3{,}45} \approx 0{,}200.$$

Столь низкое значение коэфициента трения, повидимому, оправдывается на практике. При этом

$$MV_1 = (1 - \varepsilon)\left(I_0 - \frac{MV_0}{1 + \varepsilon}\right) =$$

$$= 0{,}800\left(14{,}25 - \frac{6{,}50}{1{,}20}\right) \approx 7{,}10 \ кг\,сек.$$

Так как получилось, что $MV_1 > MV_0$, то затвор должен перейти за боевой взвод. Однако это надо проверить интегрированием уравнения движения затвора от точки воспламенения заряда, основываясь на этих предварительных данных.

Напишем соответствующие диференциальные уравнения:

а) от точки воспламенения до точки возврата R ·

$$M\ddot{x} = -p_j S_0''(1+\varepsilon) \text{ при } V_0 = 4{,}65 \text{ м/сек в момент } t = 0;$$

б) от точки возврата до окончания последействия

$$M\ddot{x} = p_j S_0''(1-\varepsilon) \text{ при } V = 0 \text{ в момент } t' = 0;$$

в) от окончания последействия до конца отката затвора

$$\frac{MV^2}{2} = \left[\frac{k}{2}(f+f_1) + R_f'\right](f-f_1).$$

Интегрирование диференциальных уравнений по пунктам „а" и „б" сводится к определению квадратур:

а)
$$MV = MV_0 - \int_0^t p_j S_0''(1+\varepsilon)\,dt =$$

$$= MV - \frac{k_j}{k_b} S_0(1+\varepsilon) \int_0^t p\,dt; \qquad (275)$$

б)
$$MV = \int_0^{t'} p_j S_0''(1-\varepsilon)\,dt = \frac{k_j}{k_b} S_0''(1-\varepsilon) \int_0^{t'} p\,dt. \qquad (276)$$

В таблице 16 приведена схема расчета по способу трапеций при 25 ординатах на участке основной ветви диаграммы. В таблице Σ_1 означает суммы ординат, взятых попарно, а Σ_2 — последовательные суммы чисел графы Σ_1. Значение MV для входа в таблицу определяем по формуле

$$MV = MV_0 - i_a S_0'' = 6{,}50 - 0{,}22 = 6{,}28.$$

К моменту окончания последействия система находится в положении $\Delta x \approx 16{,}6$ *мм* за точкой воспламенения, имея скорость $V = 5{,}05$ *м/сек*.

Полное время движения вперед $t_1 = 0{,}0786$ сек.
„ „ „ назад $t_2 = 0{,}0804$ сек.
$T = t_1 + t_2 = 0{,}1590$ сек.

Скорострельность $n \approx \frac{60}{T} \approx 378$ выстрелов в минуту.

Результаты представлены на рис. 91.

Таблица 16

Участок «а» $\frac{k_j}{k_b} S_0''(1+\varepsilon)\frac{t_0 \cdot 10^3}{50} = 0{,}232$

p	Σ_1	Σ_2	ΔMV	MV	V
300	—	0	0	6,28	4,50
483	783	783	0,18	6,10	4,36
760	1 243	2 026	0,47	5,81	4,16
1 117	1 877	3 903	0,91	5,37	3,85
1 600	2 717	6 620	1,54	4,74	3,40
2 080	3 680	10 300	2,39	3,89	2,79
2 530	4 610	14 910	3,46	2,82	2,02
2 900	5 430	20 340	4,70	1,58	1,13
3 000	5 900	26 240	6,10	0,18	0,13
2 850	5 850	32 090	7,43	—	—

Пути и времена	x м.м	$t \cdot 10^3$
Участок торможения . . .	5,63	1,56
Участок «б»	5,12	1,85
Участок последействия . .	17,10	3,60

$\Sigma t = 0{,}007$ сек.

Участок «б» $\frac{k_j}{k_b} S_0''(1-\varepsilon)\frac{t_0 \cdot 10^3}{50} = 0{,}155$

p	Σ_1	Σ_2	MV	V
3 000	—	0	0	0
2 850	5 300*	5 300	0,82	0,59
2 440	5 290	10 590	1,64	1,18
1 980	4 420	15 010	2,32	1,67
1 600	3 580	18 590	2,88	2,06
1 300	2 900	21 490	3,34	2,39
1 070	2 370	23 860	3,69	2,65
900	1 970	25 830	4,00	2,87
765	1 665	27 495	4,26	3,05
670	1 435	28 930	4,49	3,18
590	1 260	30 190	4,68	3,35
530	1 120	31 310	4,85	3,48
480	1 010	32 320	5,01	3,59
434	914	33 234	5,17	3,70
400	834	34 068	5,29	3,79
366	766	34 834	5,40	3,87
335	701	35 535	5,50	3,94
315	650	36 185	5,61	4,02

* Исправленная сумма.

Надо заметить, что система „Эрликон“ должна быть весьма чувствительной к значениям коэфициента трения гильзы f, а также к изменениям углов возвышения вследствие влияния составляющей веса $Q \cdot \sin\varphi$ и может отказывать в работе при углах снижения из-за недохода частей в заднее положение, а при углах возвышения — вследствие недостаточно интенсивного выката вперед. К этим заключениям легко притти на основании проведенного анализа. Разумеется, при проектировании системы необходимо проверить расчетом действие автоматики в различных условиях службы (углы возвышения и температуры).

Глава VIII

НОРМАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ТЕМПА СТРЕЛЬБЫ

§ 41. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПА СТРЕЛЬБЫ

Расчет темпа стрельбы проведем на одной системе пулемета с отводом пороховых газов.

Это позволит, во-первых, показать ход расчета в его последовательном развитии и, во-вторых, на конкретном примере ознакомить читателя с довольно обширным комплексом вопросов, встречающихся при проектировании почти любой системы автоматики.

Темп стрельбы измеряется числом выстрелов в минуту при автоматическом действии оружия и выражается формулой:

$$n = \frac{60}{T}, \tag{277}$$

где T — время в секундах между двумя последовательными выстрелами в очереди.

В качестве начала отсчета времени примем момент удара бойка о капсюль, отождествляя этот момент с моментом воспламенения заряда.

Принимая решение задачи внутренней балистики за математическую модель явления, будем считать, что порох сначала горит в неизменяемом объеме до тех пор, пока давление p не достигнет величины *давления форсирования* p_a, при котором снаряд стронется с места.

В рассматриваемом случае промежуток времени t_a' является „мертвым“ и все части оружия остаются в покое, так как в этом случае оружие представляет собой замкнутую систему, подверженную действию внутренних сил.

С момента, когда давление пороховых газов достигнет величины p_a, начинается движение пули в одну сторону и отдача оружия в другую сторону. При расчетах темпа стрельбы этого движения всего оружия назад не будем принимать во внимание, полагая, что оружие закреплено на жестком фундаменте.

Время t_s, протекшее от начала движения пули до момента прохождения газового отверстия, также будет потерянным временем.

Определив времена t_a' и t_s на основе решения задачи внутренней балистики, выразим остальные промежутки времени символически двумя интегралами, зависящими от путей x и скоростей u штока автоматики от крайнего переднего его положения $x=0$ до крайнего заднего положения $x=l_0$ и обратно, так что получим время одного цикла:

$$T = t_a' + t_s + \int_0^{l_0} \frac{dx}{u} + \int_{l_0}^{0} \frac{dx}{u}. \qquad (278)$$

Разумеется, эти интегралы придется вычислять по отдельным частям на различных этапах движения, так как возможно, что подинтегральная функция будет иногда претерпевать разрывы непрерывности, например в местах соударения частей и т. д.

Б. РАСЧЕТ ВРЕМЕН t_a' и t_s

Для численного примера возьмем пулемет калибра $d=7{,}6$ *мм*, считая, что решение задачи внутренней балистики дано таблицей значений p, v и t в функции относительного пути снаряда λ, выраженного в долях приведенной длины каморы l_1 (таблица 17); время t теперь отсчитывается от начала движения снаряда.

Таблица 17

λ	p *ат*	v *м/сек*	$t\cdot10^3$ сек.
0	300	0	0
0,10	1 700	82	0,261
0,20	2 277	144	0,335
0,40	2 711	231	0,422
0,52	2 780	274	0,464
0,70	2 704	327	0,511
1,00	2 512	400	0,576
1,50	2 148	488	0,670
2,00	1 886	551	0,750
3,00	1 467	643	0,886
5,00	988	757	1,118
6,00	877	796	1,210
6,85	786	823	1,300

В этой таблице скорость пули у дульного среза несколько меньше начальной скорости $v_0=825$ *м/сек*, как это и должно быть.

Пусть известно, кроме того, значение производной в начале движения снаряда

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{t=0} = \frac{D_a}{\nu_t} = 2450\cdot10^3 \ \text{ат/сек}.$$

Время t_a' не поддается точному расчету. Поэтому определим его приближенно, выразив закон давлений в период воспламенения заряда до точки $p_a = 300$ *am* показательной функцией

$$p = p_a e^{-\frac{t'}{a}}, \tag{279}$$

где t' — время, отсчитываемое в обратную сторону от начала координат (рис. 92).

Из очевидных зависимостей

$$\left(\frac{dp}{dt'}\right)_{t'=0} = -\frac{p_a}{a} = -\left(\frac{dp}{dt}\right)_{t=0}$$

определяем параметр

$$a = p_a : \left(\frac{dp}{dt}\right)_{t=0} = \frac{300}{2450} 10^{-3} = 0{,}123 \cdot 10^{-3} \text{ сек.} \tag{280}$$

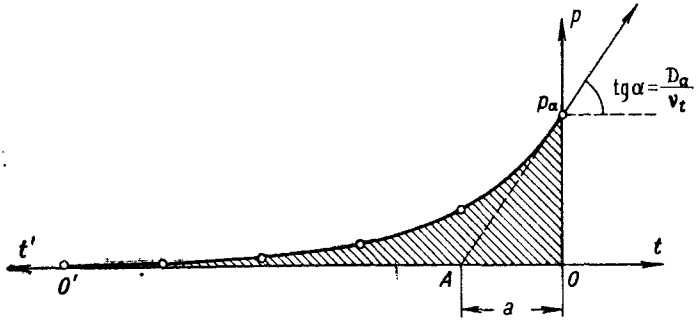


Рис. 92. Начальный участок кривой давления.

Время воспламенения заряда будем считать условно равным

$$t_a' = 5a = 0{,}62 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}, \tag{281}$$

если в нашем распоряжении нет каких-либо более точных опытных данных. Во всяком случае, при проектировании новой системы лучше воспользоваться формулой (281), чем вовсе не учитывать время t_a' из-за отсутствия данных, так как оно составляет грубо около 2% от T в нашем примере.

Для определения времени t_s необходимо измерить расстояние $\Delta l = 180$ *мм* от центра газового отверстия до дульного среза и выразить его в долях l_1. Пусть

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta l}{l_1} = 2{,}21. \tag{282}$$

Положение газового отверстия от дна пули найдем по формуле:

$$\lambda_s = \lambda_0 - \Delta\lambda = 4{,}64. \tag{283}$$

Построив комбинированную диаграмму (рис. 93) давлений и скоростей снаряда в двух аргументах — времени t и пути λ, снимем с нее значения v_s и p_s при λ_s. Теперь будем располагать данными:

$$\lambda_s = 4{,}64; \quad v_s = 740 \ м/сек; \quad p_s = 1050 \ am;$$

$$\lambda_0 = 6{,}85; \quad v_0 = 823 \ м/сек; \quad p_0 = 786 \ am.$$

Модуль нагрузки последнего участка рассчитаем по отношению давлений на границах:

$$n = \frac{p_0}{p_s} = \frac{786}{1050} = 0{,}748;$$

$$\vartheta(n) = \frac{2}{3} \cdot \frac{n+2}{n+1} = 1{,}040.$$

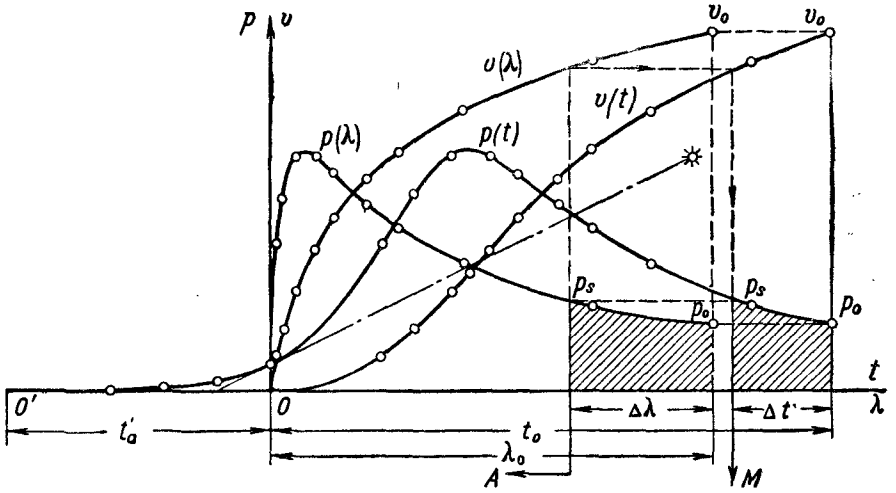


Рис. 93. Диаграмма давлений в канале.

Отсюда находим по методу проф. Бравина промежуток времени Δt, в течение которого пуля проходит расстояние Δl от центра газового отверстия до дульного среза:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{v_s + \vartheta(n)\frac{\Delta v}{2}} = \frac{180 \cdot 10^{-3}}{740 + 1{,}04\frac{83}{2}} = 0{,}230 \cdot 10^{-3} \text{ сек.} \qquad (284)$$

Искомое время t_s равно:

$$t_s = t_0 - \Delta t = 1{,}07 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

В. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОВОМ ЦИЛИНДРЕ

Кривую давлений пороховых газов в канале дополним участком последействия.

Для этого сначала рассчитаем коэфициент действия пороховых газов β по формуле В. Е. Слухоцкого с учетом коволюма α:

$$\beta = \frac{B}{v_0}\sqrt{98{,}1\, p_0 \left(\frac{w_0}{\omega} - \alpha\right)} = 1{,}60,$$

где w_0 — объем заснарядного пространства;

$$w_0 = w_a + S_0 l_0. \tag{285}$$

Считая давление на участке последействия изменяющимся приближенно по закону

$$p = p_0 e^{-\frac{t}{b}}, \tag{286}$$

найдем параметр

$$b = (\beta - 0{,}50)\frac{\omega}{g} \cdot \frac{v_0}{P_0} = 0{,}75 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}, \tag{287}$$

где

$$P_0 = p_0 \frac{k_1}{k_b} S_0.$$

На рис. 94 изображен закон изменения давления в канале на участке последействия от O'' до бесконечности, согласно формуле (286).

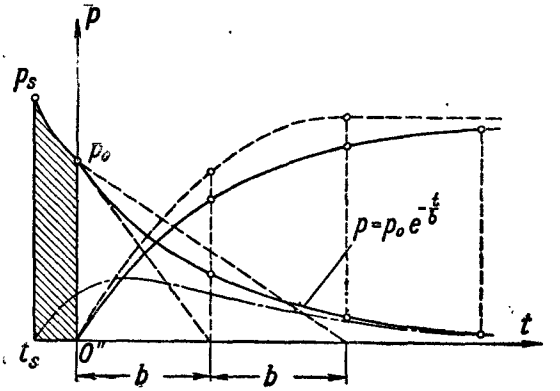


Рис. 94. Диаграмма давлений в газовом цилиндре.

Примечание. В общей теории лафетов обычно заменяют показательную функцию (286) *законом прямой линии*, по предложению французского артиллериста Валье. Для расчетов автоматики необходимо пользоваться приближенной зависимостью (286), в особенности в системах с отводом пороховых газов, так как закон прямой линии дает ложное представление об окончании действия пороховых газов спустя время $t = 2b$, как это видно из рис. 94; между тем по формуле (286) в этой точке давление равно $p = p_0 e^{-2} \approx 106\ am$.

Время последействия ограничим значением

$$\tau = 5b = 3{,}75 \cdot 10^{-3} \text{ сек.} \tag{288}$$

или же, во всяком случае, моментом выхода цилиндрической части гильзы из патронника.

На рис. 94 нанесен также участок диаграммы давлений от момента t_s до начала последействия. В момент t_s канал сообщается с газовым цилиндром поршня автоматики, где давление вначале было равно нулю; далее это давление возрастает до максимума и затем падает в соответствии с давлением последействия.

Впрочем, давление, представленное на рис. 94 ветвью кривой p_s—p_0—p_∞, при сообщении канала с газовым цилиндром само претерпевает изменение вследствие утечки части газа в газовый цилиндр. Сложность термодинамического процесса не позволяет удобно выразить закон изменения давления в газовом цилиндре.

Этот закон мы предлагаем выражать формулой вида:

$$p = p_s e^{-\frac{t}{b_1}\left(1 - e^{-\alpha\frac{t}{b_1}}\right)}, \tag{289}$$

где b_1 — параметр эквивалентной кривой расширения от точки p_s.

Формула эта легко диференцируется:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p_s}{b_1}\left[e^{-\frac{t}{b_1}} - (1+\alpha)\, e^{-(1+\alpha)\frac{t}{b_1}}\right] =$$

$$= -\frac{p_s}{b_1} e^{-\frac{t}{b_1}}\left[1 - (1+\alpha)\, e^{-\alpha\frac{t}{b_1}}\right]$$

и еще проще интегрируется, причем определяет импульс удельного давления в газовом цилиндре на единицу площади штока автоматики

$$i_{ш} = \int_0^{\infty} p\, dt = b_1 p_s \left[e^{-\frac{t}{b_1}} - \frac{1}{1+\alpha} e^{-(1+\alpha)\frac{t}{b_1}}\right]_{\infty}^{0} \approx$$

$$\approx b_1 p_s \frac{\alpha}{1+\alpha} = b_1 p_s \eta_s, \tag{290}$$

где $\eta_s = \dfrac{\alpha}{1+\alpha}$ является как бы коэфициентом полезного действия, или *коэфициентом отдачи* данного устройства.

При $\alpha = \infty$ получили бы

$$\eta_s = \frac{\alpha}{1+\alpha} = \lim_{\alpha \to \infty}\left[\frac{1}{\frac{1}{\alpha}+1}\right] = 1, \tag{291}$$

т. е. весь импульс давления передавался бы на площадь поршня автоматики без всяких потерь. Но этот идеальный импульс можно вычислить по диаграмме (рис. 94):

$$i' = (p_s + p_0)\frac{\Delta t}{2} + b p_0 = 0{,}80 \ \textit{кг сек/см}^2. \tag{292}$$

Приравнивая импульсы (292) и (290) при $\eta_s = 1$, найдем параметр

$$b_1 = \frac{i'}{p_s} = \frac{0{,}80}{1050} = 0{,}76 \cdot 10^{-3}\,\text{сек}. \tag{293}$$

Формула (289) в этом случае, т. е. при $\alpha = \infty$, будет представлять предельную ветвь

$$p = p_s e^{-\frac{t}{b_1}} \tag{294}$$

семейства кривых

$$p = p_s e^{-\frac{t}{b_1}} \left(1 - e^{-\alpha \frac{t}{b_1}}\right),$$

изображенных на рис. 95.

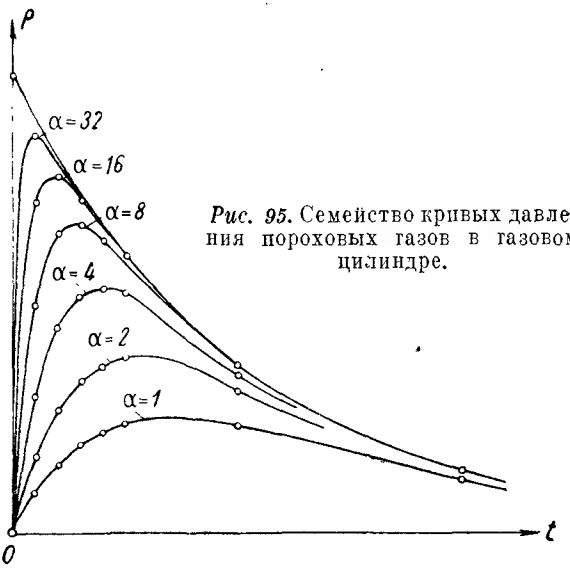


Рис. 95. Семейство кривых давления пороховых газов в газовом цилиндре.

Рассчитав идеальный импульс по формуле (292) и найдя из опыта значение коэфициента отдачи

$$\eta_{is} = \frac{\alpha}{1 + \alpha},$$

определим величину второго параметра α по формуле (291):

$$\alpha = \frac{\eta_{is}}{1 - \eta_{is}}.$$

Параметр α зависит от весьма многих факторов; в их число должны войти, по нашему мнению, следующие:

$\frac{S_s}{S_ш}$ — отношение площади сечения газового отверстия S_s к площади поршня $S_ш$ штока автоматики;

$\frac{M_ш}{S_ш}$ — отношение массы штока $M_ш$ к площади поршня $S_ш$, характеризующее *поперечную нагрузку* поршня (по аналогии с поперечной нагрузкой снаряда).

Увеличение этих факторов, очевидно, будет приближать значение импульса давления в газовом цилиндре к идеальному.

Влияние прочих факторов: формы газового цилиндра, места расположения газового отверстия по отношению дульного среза, скорости газового потока, протекающего в канале мимо отверстия, и т. д., — можно тогда объединить в общий эмпирический коэфициент c.

Таким образом, можно полагать

$$\alpha = c\frac{S_s M_{ш}}{S_{ш}^2}. \tag{295}$$

Формула (295) интересна тем, что при существовании этой зависимости для α полный импульс на площадь $S_{ш}$ имеет максимум, а не растет беспредельно с увеличением $S_{ш}$. Этот максимум наступает при

$$c = \frac{S_{ш}^2}{S_s M_{ш}};\quad \alpha = 1, \tag{296}$$

следовательно, и при

$$\eta_{ls} = \frac{\alpha}{1+\alpha} = 0{,}50. \tag{297}$$

Коэфициент c следует определять из опыта для наибольшего отверстия S_s. В нашем примере

$$M_{ш} = 61{,}5 \ \text{г сек}^2/\text{м};$$
$$S_{ш} = 2{,}54 \ \text{см}^2;$$
$$S_s = 0{,}096 \ \text{см}^2;$$
$$c = \frac{2{,}54^2}{0{,}096 \cdot 61{,}5} \approx 1{,}10.$$

Расчет автоматики проведем для среднего значения $S_s = 0{,}07$ см^2. Получаем:

$$\alpha = c\frac{0{,}07}{0{,}096} = 0{,}80;$$
$$\eta_{ls} = \frac{0{,}80}{1{,}80} \approx 0{,}45.$$

Полный импульс силы действия при этих условиях определится так:

$$I_{ш} = \eta_{ls} i' S_{ш} = 0{,}45 \cdot 0{,}80 \cdot 2{,}54 = 0{,}92 \ \text{кг сек}. \tag{298}$$

Для малого отверстия $S_s = 0{,}049$ см^2 получили бы:

$$\alpha = 0{,}56;\quad \eta_{ls} = 0{,}36;\quad I_{ш} = 0{,}73 \ \text{кг сек}.$$

Найденное соотношение между импульсами при различных отверстиях:

$d_s = 2{,}5$	3,0	3,5	мм;
$S_s = 0{,}049$	0,070	0,096	см^2;
$I_{ш} = 0{,}73$	0,92	1,00	кг сек

не противоречит и опытным данным.

Характер изменения давления в газовом цилиндре показан на рис. 94 пунктиром с точкой.

§ 42. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЗМА АВТОМАТИКИ

А. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Расчет автоматики следует начинать с построения графика движения отдельных деталей по отношению к избранному основному звену, например штоку (рис. 96).

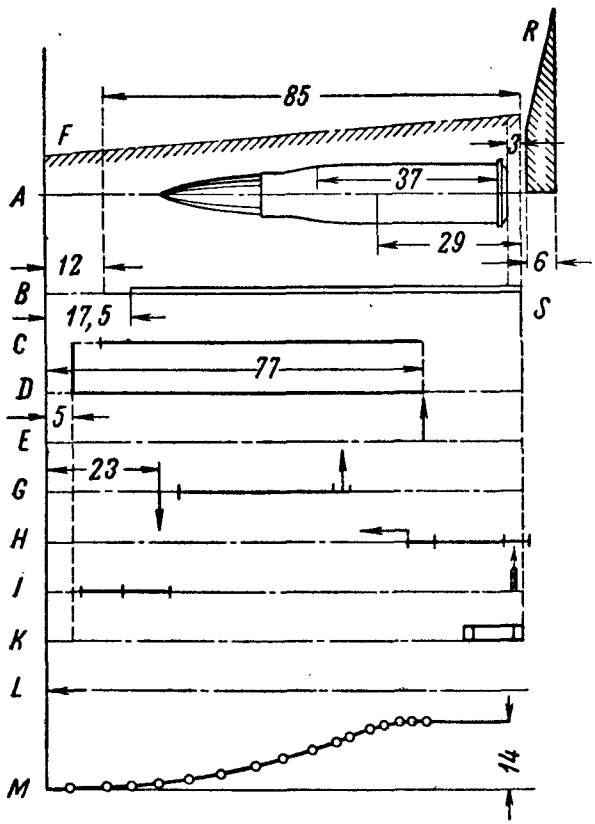


Рис. 96. График движения деталей автоматики:
A — шток (линия движения); *B* — затвор; *C* — рычаг подачи; *D* — зубчатка; *E* — защелка; *G*—подаватель; *H* — ролик включения; *I* — защелка рычага подачи; *K*—отражатель; *L*—ударник; *M* — профиль гребня; *S* — шептало; *F* — возвратная пружина; *R* — пружина буферов.

После этого необходимо по возможности точно определить веса и массы подвижных деталей, а для вращающихся частей — моменты инерции или квадраты радиусов инерции.

Заметим, что движение штока связано с движением возвратной пружины. Масса пружины может быть приведена к штоку, но это приведение выполняется в законе количеств движения при помощи множителя $^1/_2$, а в законе живых сил — при помощи множителя $^1/_3$.

Имея в виду, что при интегрировании диференциальных уравнений движения штока автоматики придется пользоваться то аргументом времени t, то аргументом пути x, было бы крайне затруднительно вести учет массы пружины двумя приемами, тем более, что это не гарантировало бы точности вследствие наличия в пружине продольных волн сжатия и растяжения. Поэтому массу пружины будем учитывать средним коэфициентом 0,40.

Выпишем в таблицу 18 известные нам веса и массы.

Таблица 18

Название деталей	Веса *кг*	Массы *кг сек²/м*
Шток с гайкой, отражатель и возвратная пружина	$Q_{ш} = 0{,}603$	$M_{ш} = 0{,}0615$
Затвор в собранном виде	$q_s = 0{,}222$	$m_s = 0{,}0226$
Гильза	$q_c = 0{,}010$	$m_c = 0{,}0010$
Патрон	$Q_c = 0{,}023$	$M_c = 0{,}0023$
Звено ленты	$q_1 = 0{,}010$	$m_1 = 0{,}0010$
Зубчатка	$Q = 0{,}382$	$M = 0{,}0389$
Подаватель	$Q_h = 0{,}034$	$M_h = 0{,}0035$
Рычаг подачи	$Q_r = 0{,}321$	$M_r = 0{,}0327$
Отражатель	$q_0 = 0{,}082$	$m_0 = 0{,}0084$

Пусть, кроме того, известны:

$D_1 = 54$ *мм* — диаметр оси зубчатки;

$D = 66{,}5$ *мм* — диаметр начальной окружности (по центрам патронов);

$\rho^2 = (31{,}5\ мм)^2$ — квадрат радиуса инерции зубчатки ($\rho \approx 95\%\ R$);

$\operatorname{tg}\beta = 0{,}425$ — тангенс наклона угла паза (по начальной окружности);

$F_c = 10$ *кг* — усилие при извлечении патрона из звена;

$s = 21$ *мм* — ход пальца рычага подачи — по касательной к начальной окружности;

$a = 84$ *мм* — плечо пальца рычага подачи (рис. 97);

$b = 56$ *мм* — плечо ведущего ролика;

$\frac{a}{b} = 1{,}50$ — отношение плеч;

$h = s\frac{a}{b} = 14$ *мм* — подъем профиля гребня (см. рис. 96).

Все массы будем приводить на линию движения штока методом редукции.

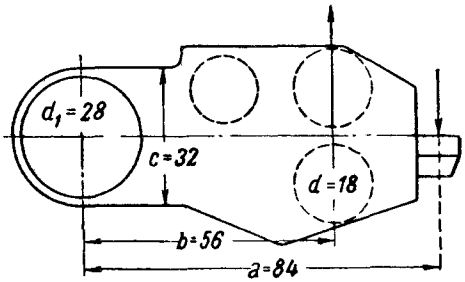


Рис. 97. Схема рычага подачи.

Б. ПРИВЕДЕНИЕ МАСС И УСИЛИЙ К ВЕДУЩЕМУ ИЛИ ВЕДОМОМУ РОЛИКУ

Прежде всего сделаем „идеальное“ приведение массы зубчатки к начальной окружности:

$$\Delta M = M\left(\frac{\rho}{R}\right)^2 = 0{,}0389\left(\frac{31{,}5}{33{,}3}\right)^2 = 0{,}0348. \qquad (299)$$

В гнездах зубчатки имеется 9 патронов, которые одновременно с проворотом скользят по винтовым пазам на оси и кожухе зубчатки. Массу этих 9 патронов, равную

$$\Delta_1 M_c = 9 \cdot 0{,}0023 = 0{,}0207, \qquad (300)$$

надо привести к начальной окружности, учтя их скольжение.

В § 35 главы VI были найдены значения коэфициентов приведения ψ_i и φ_i для этого случая при лобовом и тыловом действии связи в нормальных условиях. Необходимо дополнить эти расчеты для случая удара при тыловом действии, что происходит в момент открывания затвора.

Для приведения массы ΔM к начальной окружности располагаем следующими значениями коэфициентов ψ_i и φ_i:

$$\psi = 0{,}652; \quad \psi' = 0{,}252; \quad \psi'' = 0{,}177; \qquad (301)$$

$$\varphi = 0{,}277; \quad \varphi' = 0{,}107; \quad \varphi'' = 0{,}075. \qquad (302)$$

Коэфициентами ψ_i воспользуемся ниже для приведения усилий, например при извлечении патронов из звеньев, и по формуле

$$\Delta M_c = (1 + \varphi_i)\,\Delta_1 M_c \qquad (303)$$

рассчитаем значения приведенной массы 9 патронов на линии начальной окружности.

Теперь рассмотрим, какое влияние на подачу будет оказывать свисающая часть пулеметной ленты.

Пусть в свисающей части находится $N = 50$ патронов.

Ввиду очень сложного движения ленты при стрельбе очередью этот расчет приходится делать условно (см. конец § 36). Считаем, что при лобовом действии зубчатки каждый раз приходится преодолевать:

1) инерцию ближайших 10 патронов со звеньями, подошедших к зубчатке и потерявших скорость в момент остановки подающих органов;

2) сопротивление от веса всех 50 патронов со звеньями, что необходимо для поддержания установившегося движения остальных 40 патронов в ленте.

Тыловое действие зубчатки исключаем, так как лента представляет собой неудерживающую связь.

Кроме того, необходимо еще принять во внимание массу пяти звеньев, от которых освобождаются патроны в зубчатке. Поэтому рассчитываем дополнительно следующие величины:

$$10M_c = 0{,}0230;\quad 0\quad 0 \tag{304}$$

$$10m_1 = 0{,}0100;\quad 0\quad 0 \tag{305}$$

$$5m_1 = 0{,}0050;\quad 0{,}005;\quad 0{,}005. \tag{306}$$

Наконец, определяем массу рычага подачи, приведенную к плечу b:

1) при включенном пальце

$$\Delta M_r = M_r\left(\frac{\rho_1}{b}\right)^2 = 0{,}0327\frac{21{,}6}{5{,}6^2} = 0{,}0225; \tag{307}$$

2) при выключенном пальце

$$\Delta M_r = M_r\left(\frac{\rho_2}{b}\right)^2 = 0{,}0327\frac{20{,}2}{5{,}6^2} = 0{,}0210, \tag{308}$$

где квадраты радиусов инерции получены опытным путем.

Примечание. При проектировании автоматики можно массу ΔM_r рассчитывать по среднему значению

$$\rho^2 = 20{,}9 = 0{,}300\,a^2 \tag{309}$$

или даже по значению $\rho^2 \approx 0{,}333\ a^2$, как для однородного стержня.

Для того чтобы привести все эти массы к пальцу и затем к плечу b рычага подачи, надо рассчитать коэфициенты ψ_i и φ_i, соответствующие каждой паре звеньев нашей кинематической цепи.

Коэфициенты приведения сил и масс (301) и (302), распределенных по центровой окружности, при переходе от зубчатки к пальцу рычага подачи следовало бы рассчитывать по формуле

$$\psi_i = 1 \pm f\frac{D_1}{D}. \tag{310}$$

Но у нас имеются еще силы и массы, распределенные внизу зубчатки [формулы (304)—(306)], для которых

$$\psi_i = 1 \pm 2f\frac{D_1}{D}. \tag{311}$$

Поэтому коэфициент отдачи будет *переменным* и будет зависеть от *соотношения между статическими силами сопротивления и кинетическими реакциями*. Чтобы упростить расчет, примем для тех и других масс общее значение ψ_i по формуле (310) ввиду преобладания сил инерции над статическими силами сопротивления.

Таким образом, для всех трех случаев соответственно получаем:

$$\psi_i = \varphi_i = 1{,}11;\quad 0{,}89;\quad 0{,}83. \tag{312}$$

Коэфициенты приведения сил и масс с пальца рычага подачи к плечу b рассчитываем по отношению плеч

$$\zeta = \frac{a}{b} = 1{,}50 \tag{313}$$

в первой или во второй степени с условным учетом среднего коэфициента отдачи $\eta = 0{,}99$; находим:

$$\psi_i = 1{,}52;\quad 1{,}49;\quad 1{,}47; \tag{314}$$

$$\varphi_i = 2{,}27;\quad 2{,}23;\quad 2{,}21. \tag{315}$$

Для приведения масс ΔM_r к центровой линии роликов рычага подачи принимаем

$$\varphi_i = 1{,}01;\quad 0{,}99;\quad 0{,}98. \tag{316}$$

Последовательное приведение масс от звена к звену выполняем в таблице 19.

Таблица 19

Наименование масс	Случай „а“	Случай „б“	Удар	Формулы
Зубчатка ΔM	0,0348	0,0348	0,0348	(299)
9 патронов ΔM_c	0,0264	0,0229	0,0223	(303), (302), (300)
$\Sigma_1 =$	0,0612	0,0577	0,0571	
Массы, приведенные к пальцу рычага подачи: $\varphi_i \Sigma_1$	0,0680	0,0512	0,0480	(312)
10 патронов $\varphi_i \cdot 10 M_c$ . .	0,0257	0	0	(304), (312)
10 звеньев $\varphi_i \cdot 10 m_1$ . . .	0,0111	0	0	(305), (312)
5 звеньев $\varphi_i \cdot 5 m_1$ . . .	0,0056	0,0045	0,0042	(306), (312)
$\Sigma_2 =$	0,1104	0,0557	0,0522	
Массы, приведенные к центровой линии роликов: $\varphi_i \Sigma_2$	0,2500	0,1240	0,1150	(315)
Рычаг подачи $\varphi_i \cdot \Delta M_r$.	0,0227	0,0223	0,0221	(316), (307)
$\mu_1 =$	0,273	0,146	0,137	
$\mu_2 =$	0,021	0,021	0,021	(316), (308)

Рассчитанными приведенными массами будем пользоваться так: μ_1 — при откате штока автоматики из переднего в заднее положение, а μ_2 — при накате частей в переднее положение.

Теперь займемся приведением сил с зубчатки к центровой линии роликов, воспользовавшись коэфициентами (301), (312) и (314), относящимися только к случаям „а"—лобового действия и „б" — тылового действия, так как при ударе всеми обычными силами можно пренебрегать.

Усилие при извлечении патрона из ленты принято нами $F_c = 10$ *кг*. Но при провороте зубчатки на путь $s = 21$ *мм* по касательной патрон продвигается поступательно по направлению к приемному окну на

$$l = s \cdot \operatorname{tg} \beta = 21 \cdot 0{,}425 = 8{,}9 \text{ мм},$$

а патроны набиваются в ленту так, что расстояние от шляпки до звена равно 16—18 *мм*. Следовательно, при одном шаге зубчатки патрон еще не сойдет со звена, и при новом повороте зубчатки придется дотянуть предыдущий патрон.

Однако общее усилие, необходимое для извлечения патронов из ленты при ходе зубчатки на один шаг, нельзя считать удвоенным, так как вследствие некоторой конусности гильзы это усилие постепенно ослабевает. Ради упрощения расчета будем считать это сопротивление постоянным, приняв его

$$F_1 = 15 \text{ кг}.$$

Приведенное усилие на касательной к центровой окружности равно:

$$Q' = F_1 \psi_i = 15\,(0{,}652 \text{ или } 0{,}252) = 9{,}80;\ \ 3{,}80 \text{ кг}.$$

Вес патронов со звеньями

$$Q'' = 50\,(23 + 10)\,10^{-3} = 1{,}65 \text{ кг}.$$

Общее усилие

$$Q' + Q'' = 11{,}45;\ \ 5{,}45 \text{ кг}.$$

Сопротивление, приведенное к центровой линии роликов:

для случая „а"

$$R_0 = 11{,}45 \cdot 1{,}11 \cdot 1{,}52 = 19{,}3 \approx 19 \text{ кг}; \tag{317}$$

для случая „б"

$$R_0 = 5{,}45 \cdot 0{,}89 \cdot 1{,}49 = 7{,}2 \approx 7 \text{ кг}. \tag{318}$$

§ 43. ДВИЖЕНИЕ ШТОКА АВТОМАТИКИ ДО ВСТРЕЧИ С ГРЕБНЕМ

Шток движется на первом этапе работы автоматики по уравнению

$$M_ш \ddot{x} = P(t) - F. \tag{319}$$

Здесь действие пороховых газов на поршень

$$P(t) = p(t) S_{ш}; \tag{320}$$

сопротивление возвратной пружины

$$F = 8{,}00 + kx, \tag{321}$$

где 8 *кг* — начальное поджатие пружины, а k — ее жесткость, равная

$$k = 0{,}0775 \ кг/мм. \tag{322}$$

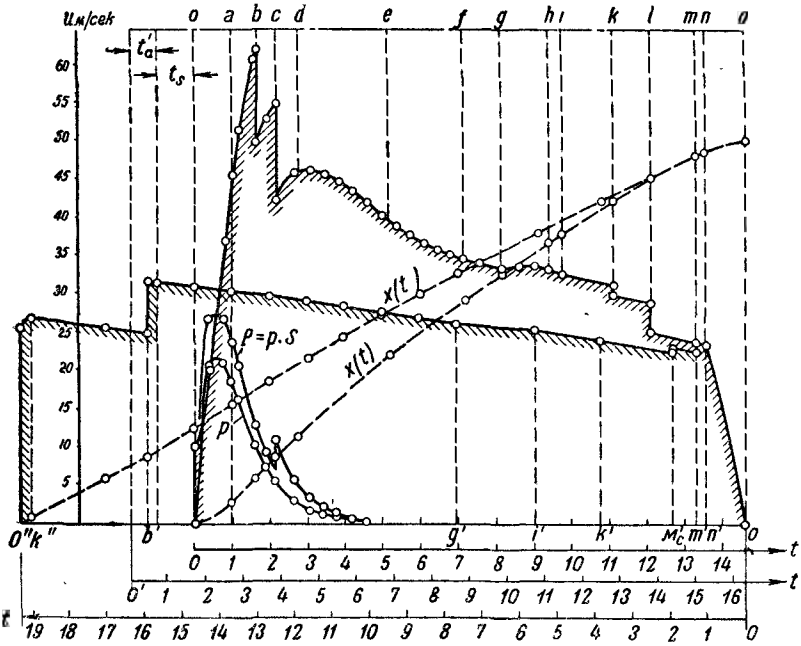


Рис. 98. Диаграмма скоростей отката и наката штока автоматики:

o — начало движения штока; *a* — начало движения зубчатки; *b* — отпирание затвора; *c* — присоединение затвора к штоку; *d* — включение подавателя; *e* — полное отжатие подавателя; *f* — конец скольжения подавателя по вершине зуба; *g* — ролик обратного хода вступает на гребень; *h* — ролик выключения начинает убирать палец; *i* — конец поворота зубчатки; *k* — включение отражателя; *l* — о ражение гильзы; *m* — шток проходит шептало; *n* — удар в буферные пружины; *o'* — конец отхода частей в заднее положение; *n'* — отражение от буферов; *m'* — удар гайки отражателя; M_c' — встреча с патроном; *k'* — отражатель убран; *i'* — вступление ролика на гребень; *g'* — точка перегиба гребня; *b'* — запирание затвора; *k"* — встреча сапожка с ударником; *o"* — накол капсюля; *p* — давление в пороховой каморе.

При стрельбе очередью это движение начинается со скоростью „отскока", которую примем

$$u_0 = 2 \ м/сек. \tag{323}$$

С этой точки начинаем построение графика движения (рис. 98).

На малом пути $x_1 = 5$ *мм* сопротивление возвратной пружины можно заменить „средним" его значением

$$F_{med} = 8{,}00 + \frac{1}{2} kx_1 = 8{,}2 \ кг.$$

Тогда уравнение (319) просто решается при помощи скоростей W и путей ξ свободного отката, т. е. при отсутствии сил сопротивления.

Найдем прежде всего значения $p(t)$ — давление в газовом цилиндре по формуле:

$$p = p_s e^{-\frac{t}{b_1}}\left(1 - e^{-\alpha\frac{t}{b_1}}\right),$$

где $p_s = 1050\ am$;

$b_1 = 0{,}76 \cdot 10^{-3}$ сек.;

$\alpha = 0{,}80$.

Таблица 20

$\frac{t}{b_1}$	$-\frac{t}{b_1}\lg e$	$-\alpha\frac{t}{b_1}\lg e$	$e^{-\alpha\frac{t}{b_1}}$	$1 - e^{-\alpha\frac{t}{b_1}}$	$e^{-\frac{t}{b_1}}$	p am
0	0	0	1,000	0	1,000	0
0,5	$\bar{1}$,7829	$\bar{1}$,8263	0,670	0,330	0,607	212
1,0	$\bar{1}$,5657	$\bar{1}$,6525	0,449	0,551	0,368	213
1,5	$\bar{1}$ 3486	$\bar{1}$,4790	0,301	0,699	0,223	164
2,0	$\bar{1}$,1314	$\bar{1}$,3051	0,202	0,798	0,135	113
2,5	$\bar{2}$,9143	$\bar{1}$,1320	0,136	0,864	0,082	74
3,0	$\bar{2}$,6971	$\bar{2}$,9578	0,091	0,909	0,050	48
3,5	$\bar{2}$,4800	$\bar{2}$,7840	0,061	0,939	0,030	30
4,0	$\bar{2}$,2628	$\bar{2}$,6103	0,041	0,959	0,018	18
4,5	$\bar{2}$,0457	$\bar{2}$,4366	0,027	0,973	0,011	11
5,0	$\bar{3}$,8285	$\bar{2}$,2630	0,018	0,982	0,007	7
5,5	$\bar{3}$,6114	$\bar{2}$,0890	0,012	0,988	0,004	4
6,0	$\bar{3}$,3942	$\bar{3}$,9153	0,008	0,992	0,002	2

Расчет давлений проведем в таблице 20, а для расчета элементов свободного отката составим таблицу 21, в которую впишем значения $\ddot{\xi}$, W и ξ, определяя их по формулам:

$$\ddot{\xi} = p(t)\frac{S_{ш}}{M_{ш}} = \frac{2{,}54}{0{,}0615}p(t) = 41{,}3\ p(t); \tag{324}$$

$$\Delta W = \left[\ddot{\xi}_i + \vartheta(m)\frac{\Delta\ddot{\xi}}{2}\right]\Delta t; \tag{325}$$

$$\Delta\xi = \left[W_i + \vartheta(n)\frac{\Delta W}{2}\right]\Delta t. \tag{326}$$

Параметр $m = \mathrm{rat}\left[\dddot{\xi}\right]_i^{i+1}$, а третьи производные мы не рассчитываем. Поэтому найдем значение m, по крайней мере для первого участка, обходным путем, построив диаграмму давлений $p(t)$ и оценив величину „луночки“, срезаемой прямой линией, проведенной на первом участке из начальной точки давления в точку p_1. Относительное значение этой „луночки“ по сравне-

нию с площадью треугольника op_1t_1 на первом участке будет равно значению *коэфициента вариации модуля*, что легко усматривается из формулы (57).

По диаграмме найдем приближенно:

$$\vartheta_1(m) \approx 1{,}25; \quad k(m) = -0{,}250,$$

а по таблицам коэфициентов вариации определим и соответствующее значение $m = 0{,}15$.

Резкое отличие этого параметра от единицы указывает на то, что при расчете $\Delta\xi$ на первом участке вообще лучше воспользоваться модулем $\vartheta(n, m)$ о двух параметрах. Для нашего случая получим:

$$\vartheta_1(n, m) = \vartheta_1(\infty, m) = 1 - \lim_{n \to \infty} \left[0{,}5 \frac{(n-1)(m+1)}{m(n+2) + (2n+1)}\right] =$$

$$= 1 - 0{,}5 \frac{m+1}{m+2} = 0{,}734.$$

На остальных участках значения всех модулей будем считать равными единице. Однако при расчете ΔW на втором участке, где функция $p(t)$ достигает максимума, учтем срезанную „луночку“ поправочным коэфициентом 1,03. Кроме того, вспомним, что

$$\Delta t = 0{,}38 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Таблица 21

$\frac{t}{b_1}$	ξ	$\Delta\ddot{\xi}$	$\vartheta(m)\frac{\Delta\ddot{\xi}}{2}$	$\vartheta(m)\frac{\Delta\ddot{\xi}}{2} + \ddot{\xi}_i$	ΔW	W	$\vartheta(n)\frac{\Delta W}{2}$	$\vartheta(n)\frac{\Delta W}{2} + W$	$\Delta\xi$ мм	ξ мм
0	0	8 770	5 480	5 480	2,08	2,00	0,76	2,76	1,05	0
0,5	8 770	40	20	8 790	3,44	4,08	1,72	5,80	2,20	1,05
1,0	8 810	−2 010	−1 105	7 805	2,96	7,52	1,48	9,00	3,43	3,25
1,5	6 800	—	—	—	—	10,48	—	—	—	6,68

Скорости u и пути x торможенного движения при $F_{\text{med}} = \text{const}$ найдутся по формулам:

$$u = W - \frac{F_{\text{med}}}{M_{\text{ш}}} t = W - \frac{8{,}2}{0{,}0615} t = W - 133\,t; \qquad (327)$$

$$x = \xi - \frac{F_{\text{med}}}{M_{\text{ш}}} \cdot \frac{t^2}{2} = \xi - 67t^2. \qquad (328)$$

Элементы торможенного движения штока даются в таблице 22.

Таблица 22

$\frac{t}{b_1}$	$t \cdot 10^3$	$133t$ м/сек	$67t^2$ мм	u м/сек	x мм
0	0	0	0	2,00	0
0,5	0,38	0,05	0,01	4,03	1,04
1,0	0,76	0,10	0,04	7,42	3,21
1,5	1,14	0,15	0,08	10,33	6,60

Графической интерполяцией определяем время и скорость при:

$$x_1 = 5 \text{ мм};$$
$$t_1 = 0{,}97 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$
$$u_1 = 9{,}20 \text{ м/сек}.$$

В этот момент ролик рычага подачи вступает на гребень штока, и зубчатка начинает проворачиваться.

§ 44. ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ ЗУБЧАТКИ

Примем, что при отходе штока назад профиль гребня на начальном участке движения неизвестен и его требуется определить по задаваемому характеру движения ролика. На конечном участке сопряжем начальную ветвь профиля с вершиной гребня плавной кривой.

Обратный ход будем рассчитывать по известному уже нам профилю, взятому из предыдущего расчета, допуская при этом некоторое сглаживание кривых.

Таким образом, будут охвачены оба случая, могущие представиться на практике: проектирование профиля гребня по рационально назначенному закону ускорений ролика и использование заданной формы гребня, например при вычислении темпа стрельбы готового образца оружия.

Зубчатка движется на пути ролика рычага подачи

$$h \approx 14 \text{ мм}.$$

На основании некоторого опыта назначаем предположительно время проворота зубчатки

$$t_0 = 8{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}.$$

Время разгона и торможения примем равным:

$$t_1 = 5{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ сек.},$$
$$t_2 = 1{,}4 \cdot 10^{-3} \text{ сек.},$$

считая, что в течение времени t_1 скорость должна была бы нарастать по закону синуса, а в течение времени t_2 она может падать по закону прямой линии (рис. 99).

Установив ориентировочно такую модель движения ролика и обозначив буквой w_0' наибольшую скорость ролика по направлению y, напишем выражение для пути h в виде:

$$h = w_0' \left[\frac{2}{\pi} t_1 + 0{,}5 t_2 + t_0 - (t_1 + t_2) \right] =$$

$$= w_0' \, (3{,}70 + 0{,}70 + 1{,}30) \, 10^{-3} = 5{,}70 \cdot 10^{-3} \, w_0'.$$

Отсюда находим

$$w_0' = \frac{14}{5{,}70} = 2{,}46 \text{ м/сек}.$$

Но вследствие того что ролик связан гребнем со штоком автоматики, испытывающим удары при отпирании и открывании затвора, скорости штока и ролика дважды понизятся резкими скачками. Поэтому постараемся сохранить закон ускорений на участке разгона, рассчитывая эти ускорения по несколько увеличенной максимальной скорости

$$w_0 = 1{,}10\, w_0' = 2{,}70 \text{ м/сек};$$

$$(\ddot{y})_{t'=0} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{w_0}{t_1} = 730 \text{ м/сек}^2.$$

Наибольшее значение силы инерции ролика, несущего на себе приведенную массу μ_1 в период разгона, следующее:

$$-\mu_1 \ddot{y} = -0{,}273 \cdot 730 = -200 \text{ кг}.$$

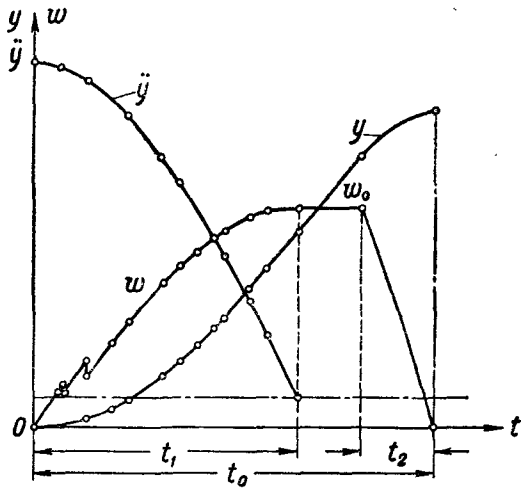


Рис. 99. Закон движения зубчатки.

Следовательно, полная кинетическая реакция ролика выразится формулой

$$L_1(t') = -(200 \cos\varphi + R_0) = -(200 \cos\varphi + 19),$$

где

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{t'}{t_1} = \frac{90^\circ}{t_1} t' = 15{,}5^\circ \cdot 10^3\, t',$$

а t' — время, отсчитываемое от начала движения ролика.

Значения функции $L(t')$ даны в таблице 23.

Для того чтобы привести величину $L(t')$, далее обозначаемую $L(t)$, к линии движения штока, надо найти значение коэфициента приведения сил, который зависит от:

$f_2 = 0{,}10$ — коэфициента трения в направляющих планки штока, несущей гребень;

$\frac{t}{b_1}$	1,275	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
$t \cdot 10^3$	0,97	1,14	1,52	1,90	2,28	2,66	3,04	3,42	3,80	4,18	4,56	4,94	5,32	5,70	6,08	6,46	6,84
$t' \cdot 10^3$	0	0,17	0,55	0,93	1,31	1,69	2,07	2,45	2,83	3,21	3,59	3,97	4,35	4,73	5,11	5,49	5,87
φ°	0	2°38′	8°32′	14°24′	20°18′	26°12′	32°6′	38°00′	43°50′	49°42′	55°36′	61°30′	67°24′	73°15′	79°6′	85°00′	90°
$\cos\varphi$	1,00	0,999	0,989	0,969	0,938	0,898	0,847	0,788	0,721	0,647	0,564	0,477	0,385	0,288	0,189	0,087	0
$\ddot{y}$	730	729	720	708	685	656	618	576	526	472	412	348	281	210	138	63	0
$-\mu_1\ddot{y}$	200	200	198	194	188	180	169	158	144	129	113	95	77	58	38	17	0
$-L(t')$	219	219	217	213	207	199	188	177	163	148	132	114	96	77	57	36	19

$f_1 = f\frac{r_1}{r_2} = 0{,}05$ — приведенного коэфициента трения (от оси ролика радиуса r_1 к радиусу ролика r_2);

$f_0 = f\frac{r}{b} = 0{,}03$ — приведенного коэфициента трения (от оси рычага подачи радиуса r к плечу b);

$\operatorname{tg}\theta = \frac{\delta y}{\delta x} = \frac{w}{u}$ — тангенса угла наклона элемента гребня, выраженного через отношения виртуальных перемещений или скоростей: w — ролика в направлении y, перпендикулярном к направлению x, и u — штока автоматики.

Коэфициент приведения сил будет равен:

$$\psi = \frac{\operatorname{tg}\theta + (f_2 + f_1)}{1 - (f_1 + f_0)\operatorname{tg}\theta} = \frac{w + (f_2 + f_1)u}{u - (f_1 + f_0)w} =$$

$$= \frac{w + 0{,}15u}{u - 0{,}08w} = \frac{A}{B}. \qquad (329)$$

Тогда приведенная сила сопротивления на штоке выразится так:

$$R_{ш} = -L(t)\cdot\psi. \qquad (330)$$

§ 45. ДВИЖЕНИЕ ШТОКА АВТОМАТИКИ ОТ НАЧАЛА ПРОВОРОТА ЗУБЧАТКИ ДО ОТКРЫВАНИЯ ЗАТВОРА

Диференциальное уравнение движения штока имеет вид:

$$M_{ш}\ddot{x} = p(t)\,S_{ш} - (8 + kx) - L(t)\frac{A}{B}. \qquad (331)$$

Интегрирование его произведем по методу проф. Бравина без производных третьего порядка $\ddot{x}$, но с последующей итерацией, т. е. повторением расчета после первого приближения.

Основной интервал времени примем равным параметру b_1. В местах разрыва непрерывности действующих сил, например при ударе или вступлении в действие новых элементов механизма, значения величин t, u и x будем находить графической интерполяцией.

По данным таблиц 20 и 22 строим диаграмму давлений $p(t)$ в газовом цилиндре и затем по ходу расчета наносим диаграммы u и x (см. рис. 98).

Все вычисления, относящиеся к интегрированию уравнений, вписываем в общую таблицу (см. приложение 5, таблица 1); в тексте же будем давать указания на ход расчета, следя одновременно за развитием процесса и за графиком движения (рис. 98).

Нанеся на диаграмму первые точки скоростей и путей, доходим до точки $x=5$ *мм*. В этот момент

$$t=0{,}97\cdot10^{-3}\text{ сек}=1{,}275\,b_1$$

ролик рычага подачи вступает на гребень штока, и движение последнего определяется уравнением (331) до $x=12$ *мм*, когда происходит встреча штока с затвором.

При $x=12$ *мм* имеем:

$$u=12{,}50\ м/сек;$$
$$t=1{,}60\cdot10^{-3}\text{ сек.};$$
$$v=0{,}460\ м/сек.$$

Приведенная масса затвора (242) при отпирании была найдена ранее (см. рис. 88):

$$\Delta m'=0{,}0143.$$

Скорость штока после удара

$$u'=u\frac{M_ш}{M_ш+\Delta m'}=12{,}50\frac{0{,}0615}{0{,}0758}\approx10{,}02\ м/сек,$$

т. е. 80% от u. В таком же соотношении окажется и скорость ролика после удара:

$$v'=0{,}80\cdot0{,}460=0{,}37\ м/сек.$$

На дальнейшем этапе движения штока приведенная масса рассчитывается по формулам (240)—(242), но при $f=0{,}10$, т. е.

$$\Delta m''=\varphi''\,\Delta m\approx0{,}0130;$$
$$M_ш+\Delta m''=0{,}0745.$$

Продолжая интегрирование, доходим до точки $x=19{,}32$ *мм* и интерполируем все величины на точку

$$x=17{,}5\ мм;$$
$$u=11{,}05\ м/сек,$$

где затвор выйдет на продольное направление. В момент $t=2{,}12\cdot10^{-3}$ сек. центр тяжести затвора будет иметь продольную скорость

$$\Delta u=\omega y_c=u\frac{\delta s}{\delta x}\cdot\frac{y_c}{l_m}=11{,}05\frac{0{,}766}{0{,}788}\cdot\frac{15}{87}=1{,}85\ м/сек.$$

Вращение затвора прекратится вследствие реакции направляющих короба, а проекция количества движения центра тяжести затвора

$$m_s\,\Delta u=0{,}0226\cdot1{,}85=0{,}042\ кг\,сек$$

сохранится. При этом произойдет соударение со штоком, обладающим количеством движения

$$M_ш\,u=0{,}0615\cdot11{,}05=0{,}680\ кг\,сек,$$

и гильзой $m_c=0{,}0010$, находящейся в патроннике.

После полного присоединения затвора к движущемуся штоку скорость их будет равна:

$$u' = \frac{M_ш u + m_s \Delta u}{M_ш + m_s + m_c} = \frac{0{,}722}{0{,}0851} = 8{,}50 \ м/сек.$$

При выходе затвора на продольное направление к действующей на шток силе $pS_ш$ прибавится давление на дно гильзы pS_c, что в сумме даст

$$P = p(S_ш + S_c) = 3{,}82\,p. \qquad (332)$$

§ 46. ВКЛЮЧЕНИЕ В ДЕЙСТВИЕ ПОДАВАТЕЛЯ, ОТРАЖЕНИЕ ГИЛЬЗЫ И УДАР В БУФЕРА

От точки $x = 17{,}50$ *мм* переходим к точке $x = 23$ *мм*, где включается в действие подаватель. При этом

$$t = 2{,}75 \cdot 10^{-3} \text{ сек.},$$
$$u = 9{,}20 \ м/сек.$$

Пружина подавателя работает в пределах 30—39 *кг* при стреле прогиба $\Delta s = 3{,}3$ *мм*, так что усилие ее

$$F = 30 + \frac{9}{\Delta s} s = 30 + 2{,}73\,s.$$

Скос зуба зубчатки, которым отжимается подаватель, расположен на радиусе $R_2 = 36{,}7$ *мм*. Обратное передаточное число на касательную к центровой окружности патронов и, следовательно, на палец рычага подачи

$$\zeta = \frac{R_2}{R} = \frac{36{,}7}{33{,}3} = 1{,}10.$$

Отношение плеч рычага подавателя

$$\zeta_1 = \frac{3}{4} = 0{,}75.$$

Скосу зуба отвечает значение $\operatorname{tg}\theta = 0{,}667$; поэтому коэфициент приведения сил

$$\psi = \frac{\operatorname{tg}\theta + f}{1 - f \cdot \operatorname{tg}\theta} = \frac{0{,}767}{0{,}933} = 0{,}82.$$

Приведенную на ролик силу найдем, принимая во внимание также ранее выведенные значения коэфициентов приведения сил для зубчатки $\psi = 1{,}11$ и рычага подачи $\psi = 1{,}52$:

$$T = F \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}82 \cdot 1{,}10 \cdot 1{,}11 \cdot 1{,}52 = 1{,}14F = 34{,}3 + 3{,}12\,s.$$

Это выражение представим в ином виде соотношением

$$s = \frac{a}{b} \zeta \operatorname{tg}\theta \zeta_1 \Delta y = 1{,}50 \cdot 1{,}10 \cdot 0{,}667 \cdot 0{,}75 \Delta y = 0{,}82 \Delta y,$$

вследствие чего добавочная сила на ролике выразится формулой

$$\Delta L = T \approx 34 + 2{,}5\Delta y.$$

В таблице интегрирования (см. приложение 5) эту силу присоединяем к величине сопротивления ролика $L(t)$, а перемещение ролика с момента $t = 2{,}75 \cdot 10^{-3}$ сек. записываем в строке для y числом со звездочкой (*0,31 и т. д.), что будет соответствовать Δy и, следовательно, полному перемещению:

$$y = 0{,}910 + 0{,}31 \text{ и т. д.}$$

При интегрировании будем следить за ростом величины Δy, имея в виду, что работа подавателя связана с ходами пальца и ролика следующим образом (таблица 24).

Таблица 24

Характер явления	Ход пальца *мм*	Ход ролика Δy *мм*	Усилие ΔL на направление y *кг*
Отжатие подавателя	6	0 — 4	$34 + 2{,}5\Delta y$
Скольжение	4 + 3	4 — 8,7	7
Свободный ход	8	—	0

Значение ΔL на второй фазе получено по формуле

$$\Delta L = fF_{max} = 1{,}10 \cdot 1{,}11 \cdot 1{,}52 \approx 7 \text{ кг}.$$

Таким образом, получаем:

а) при полном отжатии подавателя

$$t = 5{,}17 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$

$$\Delta y = 4 \text{ мм};$$

б) при окончании разгона зубчатки

$$t = 6{,}77 \cdot 10^{-3} \text{ сек.} = 0{,}97 + 5{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$

в) в конце скольжения подавателя по вершине зуба

$$t = 7{,}16 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$

$$\Delta y = 8{,}7 \text{ мм}; \quad u = 6{,}95 \text{ м/сек};$$

$$y = 0{,}91 + \Delta y = 9{,}61 \text{ мм}; \quad x = 58{,}9 \text{ мм}$$

и, наконец,

$$t = 8{,}15 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$

$$w = 2{,}43 \text{ м/сек}; \quad u = 6{,}69 \text{ м/сек};$$

$$y = 12{,}01 \text{ мм}; \quad x = 65{,}7 \text{ мм}.$$

Сопряжение профиля гребня с его вершиной выполним при помощи параболы второго порядка.

Имеем:

$$\dot{y}_0 = \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\theta_0 = \frac{w}{u} = \frac{2{,}43}{6{,}69} = 0{,}364; \tag{333}$$

$$\ddot{y} = \frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx} = a = \text{const}. \tag{334}$$

Отсюда находим:

$$\dot{y} = \dot{y}_0 + a\xi;$$

$$\Delta y = \dot{y}_0 \xi + \frac{1}{2} a\xi^2, \tag{335}$$

где ξ — текущая координата от точки $x = 65{,}7$ *мм*.

При вершине гребня

$$\dot{y}_0 + a\xi_1 = 0; \quad a = -\frac{\dot{y}_0}{\xi_1};$$

$$\dot{y}_0\xi_1 + \frac{1}{2} a\xi_1^2 = \frac{1}{2}\dot{y}_0\xi_1 = \Delta y_{\max} = 14 - 12{,}01 = 1{,}99 \text{ мм}.$$

Следовательно,

$$\xi_1 = 2\frac{\Delta y_{\max}}{\dot{y}_0} = \frac{3{,}98}{0{,}364} = 10{,}9 \text{ мм};$$

$$a = -\frac{\dot{y}_0}{\xi_1} = -\frac{0{,}364}{10{,}9} \approx -0{,}0334 \text{ мм}^{-1} = -33{,}4 \text{ м}^{-1}.$$

Уравнение движения на этом участке напишем в форме:

$$(M + \varphi\mu_1)\ddot{x} = -\psi\left(R_0 - \mu_1\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}u^2\right) - Q_{\text{med}} - F, \tag{336}$$

где $\mu_1 = 0{,}146$ — приведенная к ролику масса подвижных частей системы подачи;

$R_0 = 7$ *кг* — сопротивление, приведенное к центровой линии роликов;

Q_{med} — среднее сопротивление, испытываемое штоком вследствие утапливания пальца рычага подачи роликом включения, начиная от точки $x \approx 74$ *мм*.

Вычисления проведем в таблице 2 приложения 5, причем первую строку заполним после расчета $\ddot{x}_i$, определяя $\ddot{y}_i$ по формуле

$$\ddot{y}_i = \ddot{x}_i \cdot \operatorname{tg}\theta_i + u_i^2\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}.$$

Вписывая в графе $\operatorname{tg}\theta$ новое значение

$$\operatorname{tg}\theta_{i+1} = \operatorname{tg}\theta_i + \frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}\Delta x,$$

выполним расчет первого приближения и определим $\ddot{y}_{i+1}$. Затем рассчитаем

$$w_{i+1} = w_i + (\ddot{y}_i + \ddot{y}_{i+1}) \frac{\Delta t}{2},$$

$$y_{i+1} = y_i + (w_i + w_{i+1}) \frac{\Delta t}{2}$$

и после второго приближения удостоверимся в справедливости равенства

$$\operatorname{tg} \theta_{i+1} = \frac{w_{i+1}}{u_{i+1}}.$$

При $t = 9{,}38 \cdot 10^{-3}$ сек. и $x \approx 74$ *мм* ролик выключения входит в соприкосновение с гребнем. Поднимаясь по гребню, этот ролик проходит путь $\Delta s = 8$ *мм* и сжимает пружину силой F_1 от 4 до 8 *кг*, на что затрачивается работа

$$T = \Delta s F_{\text{med}} = 0{,}048 \text{ кгм}.$$

Положим, что для взвода пружины необходимо преодолевать на пути штока $\Delta x = 23$ *мм* среднее усилие

$$Q_{\text{med}} = \frac{T}{\eta \Delta x} = \frac{0{,}048}{0{,}80 \cdot 0{,}023} \approx 3 \text{ кг}.$$

Интегрирование уравнения движения заканчиваем моментом времени

$$t = 9{,}76 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$

$$x = 76{,}6 \text{ мм}; \qquad y \approx 14 \text{ мм};$$

$$u = 6{,}54 \text{ м/сек}; \quad w \approx 0.$$

Дальнейшие расчеты выполняем, пользуясь теоремой живых сил и работ на участках, где штоку приходится преодолевать только силы упругого сопротивления пружин. Таких участков до конца отката будет:

а) три — с сопротивлением возвратной пружины и ролика выключения

$$F_1 = F + Q_{\text{med}} = (8{,}00 + kx) + 3 = 11 + kx;$$

б) один — с сопротивлением буферов.

Для первых трех участков расчетные формулы напишем в таком виде:

удвоенная работа сил сопротивления

$$2T = \Delta x (F_i + F_{i+1}) = \Delta x [22 + k(x_i + x_{i+1})];$$

скорость в конце участка

$$u_{i+1} = \sqrt{u_i^2 - \frac{2T}{M}};$$

промежуток времени

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{u_i + \vartheta(n)\frac{\Delta u}{2}} \approx \frac{2\Delta x}{u_i + u_{i+1}}.$$

Вычисления для этих трех участков впишем в таблицу 25, заполняя ее последовательно и рассчитывая отдельно понижение скоростей в точке $x = 85$ *мм* — соударения гайки отражателя с флажком — и в точке $x = 91$ *мм* — соударения флажка с гильзой.

Таблица 25

$t_i \cdot 10^3$	9,76	11,07	12,09	13,32
u_i	6,54	6,00	5,01	4,74
x_i	76,6	85,0	91,0	97,0
x_{i+1}	85,0	91,0	97,0	—
$\Sigma = x_i + x_{i+1}$	161,6	176,0	188,0	—
$k\Sigma$	12,5	13,6	14,6	—
$F_i + F_{i+1} = 22 + k\Sigma$	34,5	35,6	36,6	—
Δx	8,4	6,0	6,0	—
$2T = \Delta x\,(F_i + F_{i+1})$	0,290	0,214	0,220	—
M	0,0851	0,0855	0,0845	0,0841
u_i^2	42,8	36,0	25,1	—
$2\frac{T}{M}$	3,4	2,5	2,6	—
u_{i+1}^2	39,4	33,5	22,5	—
u_{i+1}	6,28	5,79	4,74	—
$\Delta t \cdot 10^3$ сек.	1,31	1,02	1,23	—

В точке $x = 85{,}0$ *мм* гайка, связанная со штоком, входит в соприкосновение с винтовой частью стебля отражателя. Происходит соударение массы штока $M_ш = 0{,}0851$ с приведенной массой стебля, несущего на другом конце флажок для отражения стреляной гильзы из затвора; в момент удара $\Delta m' = 0{,}0039$.

Скорость после удара (см. стр. 204)

$$u_{i+1} = u_i \frac{M_ш}{M_ш + \Delta m'} = 6{,}28\,\frac{0{,}0851}{0{,}0890} = 6{,}00 \text{ } м/сек.$$

Дальнейшее движение штока рассчитываем с присоединенной массой отражателя:

$$\begin{aligned} \Delta m'' &= 0{,}0004 \\ M_ш &= 0{,}0851 \\ &\overline{\quad 0{,}0855} \end{aligned}$$

до точки $x = 91{,}0$ *мм*, в которой флажок отражателя, пройдя холостой ход, ударяется о гильзу. При расчете удара учитываем:

$m_1 = M_ш + \Delta m' = 0{,}0890$ — массу штока с приведенной массой отражателя;

$m_2 = 0{,}0103$ — массу гильзы, приведенную к линии движения штока;

$\varepsilon = 0{,}30$ — коэфициент восстановления, значение которого не следует преувеличивать в данном случае, так как гильза скользит по флажку.

Скорость после удара находим по формуле

$$u_{i+1} = u_i \frac{m_1 - \varepsilon m_2}{m_1 + m_2} = 5{,}79 \frac{0{,}0859}{0{,}0993} = 5{,}01 \ м/сек.$$

Торможение штока, освобожденного от массы гильзы

$$M = M_ш - m_c = 0{,}0845,$$

рассчитываем в четвертой графе таблицы 25 до точки $x = 97$ *мм*, где шток при скорости $u = 4{,}74$ *м/сек* в момент времени $t = 13{,}32 \cdot 10^{-3}$ сек. освобождается от флажка отражателя.

До буфера остается зазор в 1 *мм*, который шток проходит за время

$$\Delta t \approx \frac{1}{4{,}74} 10^{-3} = 0{,}210 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

В момент времени

$$t = (13{,}32 + 0{,}21^{\circ}) 10^{-3} \text{ сек.} = 13{,}53 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

шток с затвором ударяется в буфер, имея скорость $u = 4{,}74$ *м/сек* при $M = 0{,}0841$.

Жесткость буферных пружин $k_0 = 98{,}2$ *кг/мм*.

Начальное сопротивление, складываемое из начального поджатия и среднего сопротивления возвратной пружины, равно

$$\begin{aligned} R_0' &= 166 \ кг \\ F_{med} &= \underline{16 \ „} \\ &\quad 182 \ кг \end{aligned}$$

Дополнительная стрела сжатия определяется формулой

$$10^{-3} \left(182 + \frac{1}{2} k \Delta x \right) \Delta x = \frac{1}{2} M u^2 = 0{,}945;$$

отсюда

$$\Delta x^2 + 3{,}71 \Delta x - 19{,}25 = 0;$$

$$\Delta x = -1{,}86 + \sqrt{3{,}46 + 19{,}25} \approx 3 \ мм.$$

Для расчета времени и построения диаграммы скоростей имеем:

$$R_1' = 477 \ кг; \quad j_1 = 5680; \qquad \nu = \text{rat } [j]_1^0 = 0{,}38;$$

$$R_0' = 182 \ кг; \quad j_0 = 2160; \quad \theta(\nu) = 1{,}15;$$

$$\Delta t = \frac{2\Delta x}{\theta(\nu)\, u} = \frac{6}{1{,}15 \cdot 1{,}74} 10^{-3} = 1{,}10 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Таким образом, полное время отхода частей в заднее положение будет равно:

$$t_a + t_s \approx 1{,}70 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$
$$t = 14{,}63 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$
$$t_1 = 16{,}33 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

§ 47. ВОЗВРАТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ШТОКА АВТОМАТИКИ

До удара штока о винтовую часть стебля отражателя движение происходит в обратном порядке. Так, после отражения от буферов

$$t = 1{,}10 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$
$$u = 4{,}74 \text{ } м/сек;$$
$$x = 98 \text{ } мм,$$

а после прохождения зазора в 1 *мм*

$$t = 1{,}10 + 0{,}21 = 1{,}31 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$
$$x = 97 \text{ } мм.$$

Здесь шток встречает гайку отражателя, и скорость падает:

$$u = 4{,}74 \frac{0{,}0841}{0{,}0841 + 0{,}0039} = 4{,}52 \text{ } м/сек.$$

Далее масса штока с приведенной массой отражателя движется ускоренно, а потому (см. стр. 205)

$$M_ш + \Delta m''' = 0{,}0841 + 0{,}0031 = 0{,}0872.$$

Элементы движения рассчитываем в таблице 26; первая графа относится к пути $\Delta x = 3$ *мм* до встречи затвора с патроном $M_c = 0{,}0023$.

Таблица 26

$t_i \cdot 10^3$	1,31	1,97	3,90	5,59
u_i	4,52	4,51	4,84	5,11
x_i	97,0	94,0	85,0	76,6
x_{i+1}	94,0	85,0	76,6	—
$\Sigma = x_i + x_{i+1}$	191,0	179,0	161,6	—
$k\Sigma$	14,8	13,9	12,5	—
$F_i + F_{i+1} = 16 + k\Sigma$	30,8	29,9	28,5	—
Δx	3,0	9,0	8,4	—
$2T = \Delta x (F_i + F_{i+1})$	0,092	0,270	0,239	—
M	0,0872	0,0895	0,0864	0,0864
u_{i+1}^2	20,4	20,4	23,4	—
$2\frac{T}{M}$	1,06	3,02	2,76	—
u_{i+1}^2	21,46	23,42	26,16	—
u_{i+1}	4,63	4,84	5,11	—
$\Delta t \cdot 10^3$ сек.	0,66	1,93	1,69	—

Удар при встрече затвора с патроном рассчитываем по формуле

$$u_{i+1} = 4{,}63\frac{0{,}0845}{0{,}0868} = 4{,}51 \ м/сек.$$

Во второй графе таблицы 26 масса штока с затвором и патроном при ускоренном движении равна:

$$M = 0{,}0872 + 0{,}0023 = 0{,}0895.$$

После освобождения от флажка отражателя масса штока, затвора и патрона

$$M = 0{,}0841 + 0{,}0023 = 0{,}0864$$

движется ускоренно до точки $x = 76{,}6$ *мм* — встречи гребня с роликом обратного хода рычага подачи. В этот момент $t = 5{,}59 \cdot 10^{-3}$ сек. гребень штока начинает набегать на ролик рычага подачи, где приведенная масса рычага подачи с утопленным пальцем

$$\mu_2 = 0{,}021.$$

На скругленной части гребня

$$a = \frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx} = 0{,}0334 \ мм^{-1} = 33{,}4 \ м^{-1},$$

и диференциальное уравнение движения до точки $x = 65{,}7$ будет:

$$(M_ш + \varphi_1\mu_2)\ddot{x} = F - \psi\mu_2 u^2\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}.$$

Решаем это уравнение приближенно, зная, что для начальной точки:

$$\operatorname{tg}\theta = 0; \qquad \psi = \frac{A}{B} = 0{,}15;$$
$$A = \operatorname{tg}\theta + f' = 0{,}15; \qquad \varphi = \psi \cdot \operatorname{tg}\theta = 0;$$
$$B = 1 - f'' \cdot \operatorname{tg}\theta = 1{,}00; \quad F_1 = 8{,}00 + kx_1 = 13{,}9 \ кг.$$

Отсюда

$$\psi\mu_2 u^2\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx} = 0{,}15 \cdot 0{,}021 \cdot 5{,}11^2 \cdot 33{,}4 = 2{,}7 \ кг;$$

$$\ddot{x}_i = \frac{11{,}2}{0{,}0864} = 130 \ м/сек^2.$$

Для прохождения пути $\Delta x = 76{,}6 - 65{,}7 = 10{,}9$ *мм* со средней скоростью $u_{med} \approx 5{,}2$ *м/сек* потребовался бы промежуток времени

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{u_{med}} \approx 2{,}10 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Тогда в первом приближении получим:

$$\Delta u = \ddot{x}_i \Delta t = 0{,}27 \text{ м/сек};$$
$$u_{i+1} = 5{,}11 + 0{,}27 = 5{,}38 \text{ м/сек};$$
$$\Delta x \approx 11 \text{ мм}.$$

В конечной точке

$$\operatorname{tg}\theta = 0{,}364; \quad \psi = 0{,}530;$$
$$A = 0{,}514; \quad \varphi = 0{,}193;$$
$$B = 0{,}971; \quad F = 13{,}1 \text{ кг};$$
$$\psi\mu_2 u^2 \frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx} = 0{,}530 \cdot 0{,}021 \cdot 5{,}38^2 \cdot 33{,}4 = 10{,}8 \text{ кг};$$
$$\varphi\mu_2 = 0{,}004.$$

Следовательно,

$$\ddot{x}_{i+1} = \frac{2{,}3}{0{,}0904} = 25 \text{ м/сек}^2;$$
$$\Delta u = 0{,}16 \text{ м/сек};$$
$$u_{i+1} = 5{,}27 \text{ м/сек};$$
$$\Delta x = 10{,}9 \text{ мм};$$
$$t_{i+1} = 7{,}69 \cdot 10^{-3} \text{ сек}.$$

§ 48. ДВИЖЕНИЕ ШТОКА НА ПОСЛЕДНЕМ УЧАСТКЕ

Составим по данным отката частей назад таблицу характеристик связей, т. е. гребня.

Предварительные данные исправляем, сгладив кривые (рис. 100).

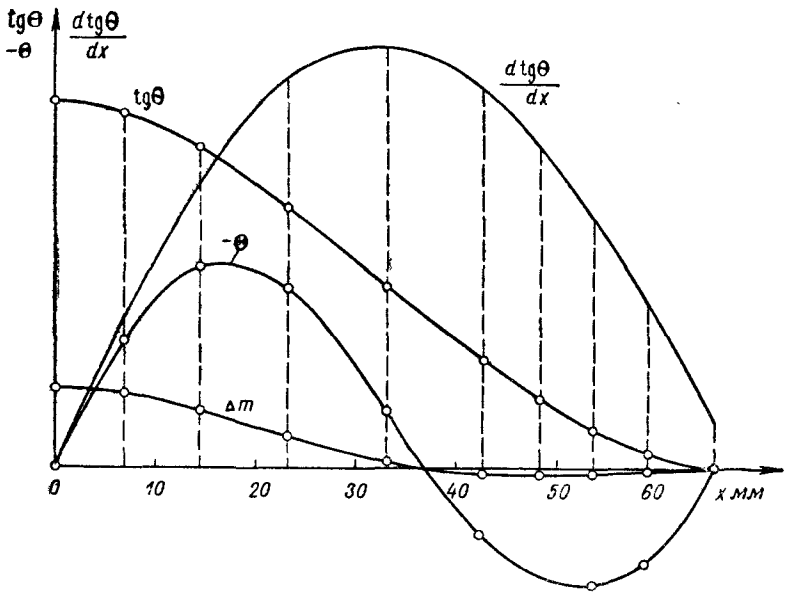


Рис. 100. Диаграмма вспомогательных функций.

Таблица 27

x'	65,7	58,9	51,2	42,5	32,7	23,0	17,5	12,0	6,66
x, *мм*	0	6,8	14,5	23,2	33,0	42,7	48,2	53,7	59,0
w	2,43	2,43	2,39	2,10	1,60	0,98	0,57	0,37	0,124
u	6,69	6,95	7,35	8,10	8,98	9,20	8,50	10,02	10,32
$\operatorname{tg}\theta$	0,364	0,350	0,325	0,260	0,179	0,107	0,067	0,037	0,012
Исправленный $\operatorname{tg}\theta$	0,364	0,355	0,325	0,262	0,185	0,107	0,070	0,037	0,012
$-\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}$	0	2,9	5,6	7,8	8,4	7,5	6,1	5,0	3,3
$A=\operatorname{tg}\theta-f'$	0,214	0,205	0,175	0,112	0,035	—0,043	—0,080	—0,113	—0,138
$B=1+f''\cdot\operatorname{tg}\theta$	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00
$\psi=\frac{A}{B}$	0,208	0,200	0,170	0,110	0,034	—0,043	—0,080	—0,113	—0,138
$\varphi=\psi\cdot\operatorname{tg}\theta$	0,076	0,071	0,055	0,029	0,0063	—0,0046	—0,0056	—0,0042	—0,0017
$-\psi\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}$	0	0,580	0,952	0,860	0,286	—0,322	—0,490	—0,560	—0,455
$\Delta m\cdot 10^4$	16,0	14,9	11,5	6,1	1,3	—1,0	—1,2	—0,9	—0,4
$-\Theta=-\frac{\Delta R}{u^2}10^2$	0	1,22	2,(0	1,81	0,60	—0,68	—1,03	—1,18	—0,96

Диференциальное уравнение движения напишем в виде:

$$(M_ш + \Delta m)\,\ddot{x} = kx' + \Theta u^2,$$

где $\Delta m = \varphi\mu_2 = \mu_2\psi \cdot \operatorname{tg}\theta$;

$x' = 65{,}7 - x$, т. е. координата от начальной точки отката;

$$\Theta = \frac{\Delta R}{u^2} = -\psi\mu_2\frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx}.$$

Значения Δm и Θ вычислены в таблице 27 и представлены диаграммой (рис. 100).

Решение диференциального уравнения проводим в таблице 28 при входных данных:

$$t = 7{,}69 \cdot 10^{-3}\ \text{сек.};$$
$$M_ш = 0{,}0864;$$
$$x' = 65{,}7\ мм;$$
$$u = 5{,}27\ м/сек.$$

Таблица 28

$t \cdot 10^3$ сек.	7,69	8,69	9,69	10,69	11,69	12,69	13,69	14,69	15,69
u, *м/сек*	5,270	5,419	5,567	5,712	5,855	5,994	6,126	6,249	6,362
x', *мм*	65,70	60,36	54,86	49,22	43,42	37,50	31,45	25,27	18,97
$-\Theta = -\frac{\Delta R}{u^2} 10^2$	0	0,95	1,75	2,05	1,90	1,30	0,45	—0,45	—1,00
u^2	27,8	29,4	31,0	32,6	34,3	35,9	37,6	39,0	40,5
$-\Theta u^2$	0	0,28	0,54	0,67	0,65	0,47	0,17	—0,18	—0,41
$8{,}00 + kx'$	13,1	12,7	12,2	11.8	11,4	10,9	10,4	10,0	9,5
Σ	13,1	13,0	12,7	12,5	12,1	11,4	10,6	9,8	9,09
$\Delta m \cdot 10^4$	16	15	14	10	7	4	1	0	0
$(M_ш + \Delta m)\,10^4$	880	879	878	874	871	868	865	864	864
$\ddot{x}$	149	148	145	143	139	132	123	113	105
Δu	0,149	0,148	0,145	0,143	0,139	0,132	0,123	0,113	0,105
$-\Delta x$, *мм*	5,32	5,50	5,64	5,80	5,92	6,05	6,18	6,30	—
x	0	5,34	10,84	16,48	22,28	28,20	34,25	40,43	46,73
$\Delta t \cdot 10^3$ сек.	1	1	1	1	1	1	—	—	—

При $t = 15{,}69 \cdot 10^{-3}$ сек. имеем:

$$x' = 18{,}97\ мм;$$
$$u = 6{,}36\ м/сек.$$

Остающийся путь

$$\Delta x = 18{,}97 - 17{,}50 = 1{,}47\ мм$$

до начала запирания затвора шток проходит в течение времени

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{u} = 0{,}23 \cdot 10^{-3}\ \text{сек.},$$

причем получается приращение скорости

$$\Delta u = \ddot{x}\,\Delta t = 0{,}105 \cdot 0{,}23 = 0{,}023 \ м/сек.$$

Таким образом, запирание затвора начнется при следующих данных:

$$t = 15{,}92 \cdot 10^{-3} \text{ сек.};$$
$$u = 6{,}38 \ м/сек.$$

Приведем массу затвора к радиусу ударной поверхности сапожка при запирании:

$$r = 7{,}5 \ см;$$

$$\Delta m' = m_s \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 = 0{,}0226 \ \frac{33{,}0}{7{,}5^2} = 0{,}0133.$$

Углы $\alpha_1 = 40°$; $\alpha_2 = 10°$.

Обратное передаточное число и коэфициенты приведения:

а) при ударе

$$\zeta_1 = \frac{\cos\alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} = 1;$$
$$\psi_1 = 1{,}67;$$
$$\varphi_1 = 1{,}67;$$

б) при ускоренном движении

$$\zeta_1 = 1;$$
$$\psi_1' = 1{,}40;$$
$$\varphi_1' = 1{,}40.$$

Затвор при ударе о пенек ствола приобретает количество движения по направлению виртуального перемещения, определяемое из соотношения моментов количества движения:

$$m_s u \frac{h}{2} = \Delta m' w r;$$

$$\Delta m'\, w = u \frac{h}{2r} m_s = 6{,}38 \ \frac{1{,}2}{7{,}5} \ 0{,}0226 = 0{,}0230.$$

Приведенная масса затвора при ударе

$$\Delta m_1 = \varphi_1 \Delta m' = 1{,}67 \cdot 0{,}0133 = 0{,}0222.$$

Приведенное количество движения

$$\zeta \Delta m' w = 0{,}0230.$$

Скорость после удара

$$u = \frac{0{,}0615 \cdot 6{,}38 + 0{,}0230}{0{,}0837} = 5{,}00 \ м/сек.$$

При дальнейшем ускоренном движении, до $x = 12$ *мм*, приведенная масса затвора

$$\Delta m = 1{,}40 \cdot 0{,}0133 = 0{,}0186,$$

а после окончательного запирания затвора

$$\Delta m = 0.$$

Элементы движения на этих двух участках рассчитываем в таблице 29.

Таблица 29

$t \cdot 10^3$ сек.	15,92	17,01	19,01
u_i	5,00	5,12	5,41
x_i	17,5	12,0	1,5
x_{i+1}	12,0	1,5	0
$\Sigma = x_i + x_{i+1}$	29,5	13,5	1,5
$k\Sigma$	2,29	1,05	0,12
$F_i + F_{i+1} = 16 + k\Sigma$	18,29	17,05	16,12
Δx	5,5	10,5	1,5
$2T = \Delta x\,(F_i + F_{i+1})$	0,101	0,180	0,024—0,200
M	0,0801	0,0615	0,0615
u_i^2	25,00	26,26	29,19
$2\frac{T}{M}$	1,26	2,93	—2,85
u^2_{i+1}	26,26	29,19	26,34
u_{i+1}	5,12	5,41	5,14
$\Delta t \cdot 10^3$ сек.	1,09	2,00	0,29

В последней графе учтена удвоенная работа на разбитие капсюля:

$$2T' = 2 \cdot 0{,}10) = 0{,}200.$$

Полное время наката

$$t_2 = 19{,}30 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Период цикла работы автоматики

$$T = t_1 + t_2 = 16{,}33 + 19{,}30 = 35{,}63 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Скорострельность

$$n = \frac{60}{T} = 1680 \text{ выстрелов в минуту.}$$

ТАБЛИЦА КОЭФИЦИЕНТОВ N_a ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОИЗВОДНОЙ ДАВЛЕНИЯ $p(t_y)$ В МОМЕНТ ФОРСИРОВАНИЯ

Δ	N_a	Δ	N_a	Δ	N_a	Δ	N_a
0,05	3,04	0,30	3,84	0,55	4,76	0,80	6,28
0,06	3,10	0,31	3,87	0,56	4,81	0,81	6,36
0,07	3,14	0,32	3,90	0,57	4,86	0,82	6,44
0,08	3,18	0,33	3,94	0,58	4,91	0,83	6,53
0,09	3,22	0,34	3,97	0,59	4,96	0,84	6,61
0,10	3,25	0,35	4,00	0,60	5,01	0,85	6,70
0,11	3,28	0,36	4,03	0,61	5,06	0,86	6,79
0,12	3,31	0,37	4,07	0,62	5,12	0,87	6,88
0,13	3,34	0,38	4,10	0,63	5,17	0,88	6,97
0,14	3,37	0,39	4,14	0,64	5,23	0,89	7,07
0,15	3,40	0,40	4,17	0,65	5,29	0,90	7,17
0,16	3,43	0,41	4,20	0,66	5,34	0,91	7,27
0,17	3,46	0,42	4,24	0,67	5,40	0,92	7,38
0,18	3,49	0,43	4,28	0,68	5,46	0,93	7,48
0,19	3,52	0,44	4,31	0,69	5,53	0,94	7,59
0,20	3,55	0,45	4,35	0,70	5,59	0,95	7,70
0,21	3,58	0,46	4,39	0,71	5,65	—	—
0,22	3,61	0,47	4,43	0,72	5,72	—	—
0,23	3,64	0,48	4,47	0,73	5,79	—	—
0,24	3,66	0,49	4,51	0,74	5,85	—	—
0,25	3,69	0,50	4,55	0,75	5,92	—	—
0,26	3,72	0,51	4,59	0,76	5,99	—	—
0,27	3,75	0,52	4,63	0,77	6,06	—	—
0,28	3,78	0,53	4,68	0,78	6,13	—	—
0,29	3,81	0,54	4,72	0,79	6,20	—	—

Формула

$$D_a = \left(\frac{dp}{dt_y}\right)_0 = \frac{p_a\sqrt{fg}}{\sqrt{B}} \cdot \frac{\left(1-\frac{\Delta}{\delta}\right)k_1}{\left(1-\frac{\Delta}{\delta}-\psi_a\frac{\Delta}{\delta_1}\right)^2} = \frac{N_a}{\sqrt{B}}.$$

Для таблиц АНИИ, изд. 1933 г.

$$D_a' = \frac{N_a'}{\sqrt{B}}, \text{ где } N_a' = \frac{N_a}{\sqrt{1{,}05}} \approx 0{,}975 N_a.$$

При ином сорте пороха f'' и ином давлении $p''_a \neq 300$ *am* производная по удельному времени $t_y \cdot 10^5$

$$N_a'' = \frac{p_a''}{300}\sqrt{\frac{f''}{950000}} \cdot N_a.$$

ПРИМЕР НА ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПИРОДИНАМИКИ ПО СПОСОБУ проф. Е. Л. БРАВИНА

Покажем ход решения задачи для стандартного пороха:

$$f = 950\,000 \ \partial м\,кг/кг; \qquad \Theta = 0{,}20;$$
$$\alpha = 0{,}98 \ \partial м^3/кг; \qquad \varkappa' = 1{,}06;$$
$$\delta = 1{,}60 \ кг/\partial м^3; \qquad \varkappa'\lambda' = 0{,}06;$$

$$\delta_1 = \frac{\delta}{\alpha\delta - 1} = 2{,}8; \qquad p_a = 30\,000 \ кг/\partial м^2$$

в случае

$$\Delta = 0{,}60; \qquad \psi_a = 0{,}03256;$$
$$B = 2{,}00; \qquad \zeta_a = 0{,}03080.$$

Рассчитаем значение величин:

$$k_1 = \varkappa' - 2\varkappa'\lambda'\zeta_a = 1{,}056;$$

$$\varkappa'\lambda' = 0{,}06; \qquad 0{,}5\Theta B = 0{,}20;$$
$$\frac{\Delta}{\delta_1} = 0{,}214; \qquad 1 - \frac{\Delta}{\delta} = 0{,}6250;$$
$$2\varkappa'\lambda' = 0{,}12; \qquad \Theta B = 0{,}40;$$
$$f\Delta = 570\,000; \qquad Bf\cdot\Delta = 1\,140\,000.$$

Систему уравнений пиродинамики напишем в виде;

$$\psi = k_1 z - \varkappa'\lambda' z^2 + \psi_0;$$

$$p = f\Delta\,\frac{\psi - 0{,}5\Theta B z^2}{1 - \frac{\Delta}{\delta} - \psi\frac{\Delta}{\delta_1} + \lambda} = f\Delta\,\frac{N}{G};$$

$$\dot{\lambda} = Bf\Delta\,\frac{z}{p} = B\frac{G}{N}z,$$

где $N = \psi - 0{,}5\,\Theta B z^2$;

$$G = \lambda + 1 - \frac{\Delta}{\delta} - \psi\frac{\Delta}{\delta_1} = \lambda + a;$$

$$a = 1 - \frac{\Delta}{\delta} - \psi\frac{\Delta}{\delta_1}.$$

Найдем выражение производных:

$$\dot{\psi} = k_1 - 2\varkappa'\lambda' z;$$

$$\frac{dp}{dz} = D(z) = p\left(\frac{\dot{N}}{N} - \frac{\dot{G}}{G}\right) = p(\nu - \gamma) = p\xi;$$

$$\ddot{\lambda} = B\frac{G}{N} - \dot{\lambda}\left(\frac{\dot{N}}{N} - \frac{\dot{G}}{G}\right) = B\frac{G}{N} - \dot{\lambda}(\nu - \gamma) = B\frac{G}{N} - \dot{\lambda}\xi,$$

где $\dot{N} = \dot{\psi} - \Theta B z$; $\quad \nu = \dot{N}/N$;

$\dot{G} = \dot{\lambda} + \dot{a}$; $\quad \gamma = \dot{G}/G$;

$\dot{a} = -\dot{\psi}\frac{\Delta}{\delta_1}$; $\quad \xi = \nu - \gamma$.

Промежуток интегрирования для первых двух точек берем равным $\Delta z = 0{,}05$; для последующих точек можно принять $\Delta z = 0{,}10$.

Составим таблицу значений вспомогательных функций (таблица 1), зависящих только от аргумента z. Они необходимы для основной таблицы 2, в которой проведем численное интегрирование.

Рассчитав первую графу основной таблицы 2, переходим к первому приближению — графа I для $z = 0{,}05$.

Ввиду наличия особенной точки в начале координат необходимо предварительно найти обходным путем „нулевое" приближение для p_1 с помощью производной $D(z)$ при $z = 0$, так как из диаграммы (рис. 14) видно, что именно функция $p(z)$ отступает от своей касательной медленнее всех прочих функций. Имеем:

$$p_1 \approx p_a + D(0)\,\Delta z = 30\,000 + 983\,000 \cdot 0{,}05 = 79\,150.$$

По этому значению p_1 определяем следующие элементы:

$$\dot{\lambda}_1 \approx Bf\Delta\frac{z_1}{p_1} = 1140000\frac{0{,}05}{79150} = 0{,}720;$$

$$\frac{G_1}{N_1} \approx \frac{f\Delta}{p_1} = \frac{570000}{79150} = 7{,}20;$$

$$G_1 \approx 7{,}20 \cdot N_1 = 7{,}20 \cdot 0{,}0847 = 0{,}6100.$$

Особым расчетом, вне основной таблицы, находим:

$$\dot{G}_1 = \dot{\lambda}_1 + \dot{a}_1 = 0{,}720 - 0{,}225 = 0{,}495;$$

$$\xi_1 = \nu_1 - \gamma_1 = 12{,}16 - \frac{0{,}495}{0{,}6100} = 11{,}35;$$

$$2\frac{G_1}{N_1} = 14{,}40; \quad \dot{\lambda}_1\xi_1 = 8{,}17;$$

$$\ddot{\lambda}_1 = 2\frac{G_1}{N_1} - \dot{\lambda}\xi = 6{,}23.$$

Отсюда по формуле квадратур Эйлера получаем:

$$\lambda_1 \approx \dot{\lambda}_1 \frac{\Delta z}{2} - (\ddot{\lambda}_1 - \ddot{\lambda}_0)\frac{\Delta z^2}{12} =$$

$$= 0{,}0180 + \frac{31{,}77}{12}\, 0{,}05^2 = 0{,}0246.$$

Это значение λ_1 принимаем в качестве первого приближения для $z = 0{,}05$. Рассчитав $\ddot{\lambda} = 6{,}45$, вычисляем $\Delta\lambda$ во втором приближении по формуле квадратур Эйлера уже в самой таблице 2. Получив новое значение $\ddot{\lambda} = 6{,}47$ во втором приближении, переходим к следующей графе таблицы, полагая в первом приближении $\ddot{\lambda}_i = \ddot{\lambda}_{i+1} = \text{const}$, и т. д.

Примечание. На первом участке, вследствие слишком быстрого возрастания функции $\dot{\lambda}$ близ начала координат, было бы методически более правильно рассчитывать $\Delta\lambda$ вне таблицы по формуле

$$\Delta\lambda = \int_0^{z_1} \dot{\lambda} dz = \dot{\lambda}_1 z_1 - \int_0^{\dot{\lambda}_1} z\, d\dot{\lambda} = \dot{\lambda}_1 z_1 - \left[z_1 - \frac{\Delta\dot{\lambda}}{6}\left(\dot{z}_1 - \dot{z}_0\right)\right]\frac{\Delta\dot{\lambda}}{2} =$$

$$= \frac{\dot{\lambda}_1 z_1}{2} + \frac{\dot{\lambda}_1^2}{12}\left(\frac{1}{\ddot{\lambda}_1} - \frac{1}{\ddot{\lambda}_0}\right),$$

где

$$\ddot{\lambda} = \frac{d\dot{\lambda}}{dz};\ \dot{z} = \frac{dz}{d\dot{\lambda}} = \frac{1}{\ddot{\lambda}};\ \Delta\dot{\lambda} = \dot{\lambda}_1.$$

Это дало бы для второго приближения более точное значение $\lambda_1(2) = 0{,}0246$ вместо 0,0252, полученного при вычислении непреобразованной квадратуры.

При данном методе расчета, когда имеется уже готовое значение производной

$$\frac{dp}{dz} = D(z),$$

легко определить также значение производной давления по удельному времени при любом значении аргумента z:

$$\frac{dp}{dt_y} = \frac{dp}{dz}\cdot\frac{dz}{dt_y} = D(z)\frac{dz}{dt_y},$$

причем на основании формул (32) и (39)

$$\frac{dz}{dt_y} = \frac{1}{\sqrt{Bfg}}\cdot\frac{dv_y}{dt_y} = \frac{1}{\Delta}\sqrt{\frac{g}{Bf}}\cdot p.$$

В нашем примере

$$\frac{1}{\Delta}\sqrt{\frac{g}{Bf}}=\frac{1}{0{,}60}\sqrt{\frac{98{,}1}{2\cdot 950000}}=1{,}20\cdot 10^{-2},$$

следовательно,

$$\frac{dp}{dt_y}=1{,}20\cdot 10^{-2}\,p\,D(z).$$

Условимся выражать: p—в *кг/см*^{2}; v_y—в *м/сек*; $t_y\cdot 10^5$—в *сек/м*.

Тогда расчетная формула для производной давления будет иметь вид:

$$\frac{dp}{dt_y}=1{,}20\cdot 10^{-6}\,p\,D(z),$$

что для начальной точки дает

$$D_a=\left(\frac{dp}{dt_y}\right)_0=1{,}20\cdot 10^{-6}\cdot 300\cdot 9830=3{,}54,$$

а для точки при $z=0{,}10$

$$D_1=1{,}20\cdot 10^{-6}\cdot 1162\cdot 7280=10{,}15.$$

Теперь остается рассчитать скорости v_y в период горения пороха по формуле

$$v_y=z\sqrt{Bfg}=13670\,z\ \ дм/сек=1367\,z\ \ м/сек,$$

найти давление и скорости в период расширения пороховых газов и, наконец, перейти к расчету удельных времен t_y.

Первый вопрос соединим с последним, вписывая скорости в период горения пороха непосредственно в таблицу расчета времен (см. стр. 272).

Напишем расчетные формулы для периода расширения.

$$p=p_k\,\eta^{1+\theta};\ \ p_k=1400\ \ am;$$

$$\eta=\frac{1-\alpha\Delta+\lambda_k}{1-\alpha\Delta+\lambda}=\frac{a_k+\lambda_k}{a_k+\lambda};$$

$$a_k=1-\alpha\Delta=1-0{,}589=0{,}411;$$

$$v_y^2=\frac{2}{\theta}fg\left\{1-\eta^{\theta}\left[1-0{,}5\theta B(1-\zeta_0)^2\right]\right\}=$$

$$=\frac{2}{\theta}fg\left\{1-\eta^{\theta}\,N_k\right\}=\frac{2}{\theta}fg\left[1-0{,}8121\,\eta^{\theta}\right]=$$

$$=\frac{2}{\theta}fg\,(1-\beta),$$

$$\beta=0{,}8121\,\eta^{\theta};$$

$$v_y=3055\sqrt{1-\beta}\ \ м/сек.$$

Таблица 1

РАСЧЕТ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

z	0	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,9692
$1,056z$	0	0,0528	0,1056	0,2112	0,3168	0,4224	0,5280	0,6336	0,7392	0,8448	0,9504	1,0240
$0,06z^2$	0	0,0002	0,0006	0,0024	0,0054	0,0096	0,0150	0,0216	0,0294	0,0384	0,0486	0,0564
Dif*	0	0,0526	0 1050	0,2088	0 3114	0,4128	0,5130	0,6120	0,7098	0,8064	0,9018	0,9676
$\psi = Dif^* + 0,0326$	0,0326	0,0852	0,1376	0,2414	0,3440	0,4454	0 5456	0,6446	0,7424	0,8390	0,9344	1,0000
$0,20z^2$	0	0,0005	0 0020	0,0080	0,0180	0,0320	0,0500	0 0720	0,0980	0,1280	0.1620	0,1879
$N = \psi - 0,20z^2$	0,0326	0,0847	0,1356	0,2334	0,3260	0,4134	0,4956	0,5726	0,6444	0,7110	0,7724	0,8121
$0,214\psi$	0,0070	0,0182	0,0294	0,0517	0,7360	0,0954	0 1170	0,1380	0,1590	0,1779	0,2000	0,2140
$a = 0,6250 - 0,214\psi$	0,6180	0,6068	0,5956	0,5733	0,5514	0,5296	0,5080	0,4870	0,4660	0,4453	0,4250	0,4110
$0,12z$	0	0,0060	0,0120	0,0240	0,0360	0,0480	0,0600	0,0720	0,0840	0,0960	0,1080	0,1162
$\dot{\psi} = 1,056 - 0,12z$	1,056	1,050	1,044	1,032	1,020	1,008	0,996	0 984	0,972	0,960	0,948	0,940
$0,40z$	0	0,0200	0,0400	0,0800	0,1200	0,1600	0,2000	0,2400	0,2800	0,3200	0,3600	0,3877
$\dot{N} = \dot{\psi} - 0,40z$	1 056	1,030	1,004	0,952	0,900	0,848	0,796	0,744	0,692	0,640	0,588	0,552
$\dot{a} = -0,214\dot{\psi}$	—0,226	—0,225	—0 224	0,221	—0,218	—0,216	—0,213	—0,210	—0,208	—0,206	—0,203	—0,201
$\nu = \dot{N}/N$	32,40	12,16	7,41	4,08	2,76	2,055	1,615	1,300	1,075	0,900	0,762	0,680

* Dif — разность стоящих выше двух чисел.

z	θ	0,05		0,10	
		I	II	I	II
λ	0	0,0246	0,0252	0,0706	0,0690
a	0,6180	0,6068	0,6068	0,5956	0,5956
$G = \lambda + a$	0,6180	0,6314	0,6320	0,6662	0,6646
N	0,0326	0,0847	0,0847	0,1356	0,1356
G/N	19,00	7,45	7,46	4,91	4,90
$p = 570\,000\ N/G$	30 000	76 500	76 400	116 000	116 200
$\dot{\lambda} = 2\ G/N\ z$	0	0,745	0,746	0,982	0,980
$\dot{a}$	—0,226	—0,225	—0,225	—0,224	—0,224
$G = \dot{\lambda} + \dot{a}$	—0,226	0,520	0,521	0,758	0,756
$\nu = \dot{N}/N$	32,40	12,16	12,16	7,41	7,41
$\gamma = \dot{G}/G$	—0,370	0,824	0,824	1,14	1,14
$\xi = \nu - \gamma$	32,77	11,34	11,34	6,27	6,27
$D(z) = p\xi$	983 000	868 000	868 000	728 000	728 000
$2G/N$	38,00	14,90	14,92	9,82	9,80
$\dot{\lambda}\xi$	0	8,45	8,45	6,15	6,15
$\ddot{\lambda} = 2G/N - \dot{\lambda}\xi$	38,00	6,45	6,47	3,67	3,65
Δz	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10
1) $\frac{\Delta\dot{\lambda}}{2} = \ddot{\lambda}_i \frac{\Delta z}{2}$	—	—	0,162	—	0,162
$\Delta\lambda = \left(\dot{\lambda}_i + \frac{\Delta\dot{\lambda}}{2}\right)\Delta z$	0,0246*	—	0,0454	—	0,1162
2) $\Delta\ddot{\lambda} = \ddot{\lambda}_i - \ddot{\lambda}_{i-1}$	—	—31,55	—	—2,80	—
$\dot{\lambda}_i + \dot{\lambda}_{i-1}$	—	0,745	—	1,728	—
$\Delta\ddot{\lambda}\frac{\Delta z}{6}$	—	—0,263	—	—0,023	—
Dif	—	1,008	—	1,751	—
$\Delta\lambda = \frac{\Delta z}{2}$ Dif	—	0,0252	—	0,0438	—

Таблица 2

0,20		0,30		0,40	
I	II	I	II	I	II
0,1852	0,1835	0,3283	0,3289	0,5084	0,5096
0,5733	0,5733	0,5514	0,5514	0,5296	0,5296
0,7585	0,7568	0,8797	0,8803	1,0380	1,0392
0,2334	0,2334	0,3260	0,3260	0,4134	0,4134
3,25	3,24	2,70	2,70	2,51	2,51
175 500	176 000	211 000	211 000	227 000	227 000
1,300	1,296	1,620	1,620	2,008	2,008
—0,221	—0,221	—0,218	—0,216	—0,216	—0,216
1,079	1,075	1,402	1,402	1,792	1,792
4,08	4,08	2,76	2,76	2,055	2,055
1,42	1,42	1,59	1,59	1,727	1,725
2,66	2,66	1,17	1,17	0,328	0,330
467 000	468 000	247 000	247 000	74 500	75 000
6,50	6,48	5,40	5,40	5,020	5,020
3,46	3,44	1,90	1,90	0,658	0,658
3,04	3,04	3,50	3,50	4,362	4,362
0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
—	0,152	—	0,175	—	0,218
—	0,1448	—	0,1795	—	0,2226
—0,61	—	0,46	—	0,862	—
2,280	—	2,916	—	3,628	—
—0,010	—	0,008	—	0,014	—
2,290	—	2,908	—	3,614	—
0,1145	—	0,1454	—	0,1807	—

z	0,50		0,60		0,70	
	I	II	I	II	I	II
λ	0,7322	0,7340	1,0118	1,015	1,366	1,370
a	0,5080	0,5080	0,4870	0,4870	0,4660	0,4660
$G = \lambda + a$	1,240	1,242	1,4988	1,502	1,832	1,836
N	0,4956	0,4956	0,5726	0,5726	0,6444	0,6444
G/N	2,50	2,50	2,62	2,62	2,85	2,85
$p = 570\,000\ N/G$	228 000	228 000	217 500	217 500	200 000	200 000
$\dot{\lambda} = 2\ G/Nz$	2,500	2,500	3,145	3,145	3,990	3,990
$\dot{a}$	—0,213	—0,213	—0,210	—0,210	—0,208	—0,208
$G = \dot{\lambda} + \dot{a}$	2,287	2,287	2,935	2,935	3,782	3,782
$\nu = \dot{N}/N$	1,615	1,615	1,300	1,300	1,075	1,075
$\gamma = \dot{G}/G$	1,845	1,840	1,958	1,952	2,065	2,060
$\xi = \nu - \gamma$	—0,230	—0,225	—0,658	—0,652	—0,990	—0,985
$D(z) = p\xi$	—52 500	—51 300	—143 000	—142 000	—198 000	—197 000
$2G/N$	5,00	5,00	5,24	5,24	5,70	5,70
$\dot{\lambda}\xi$	—0,58	—0,56	—2,07	—2 05	—3,95	—3,93
$\ddot{\lambda} = 2G/N = \dot{\lambda}\,\xi$	5,58	5,56	7,31	7,29	9,65	9,67
Δz	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
1) $\frac{\Delta\dot{\lambda}}{2} = \ddot{\lambda}_i \frac{\Delta z}{2}$	—	0 278	—	0,364	—	0,484
$\Delta\lambda = \left(\dot{\lambda}_i + \frac{\Delta\dot{\lambda}}{2}\right)\Delta z$	—	0,2778	—	0,351	—	0,447
2) $\Delta\ddot{\lambda} = \ddot{\lambda}_i - \ddot{\lambda}_{i-1}$	1,22	—	1,75	—	2,36	—
$\dot{\lambda}_i + \dot{\lambda}_{i-1}$	4,508	—	5,645	—	7,135	—
$\Delta\ddot{\lambda}\,\frac{\Delta z}{6}$	0,020	—	0,029	—	0,040	—
Dif	4,488	—	5,616	—	7,095	—
$\Delta\lambda = \frac{\Delta z}{2}$ Dif	0,2244	—	0,2808	—	0,3548	—

0,80		0,90		0,9692	
I	II	I	II	I	II
1,817	1,822	2,395	2,402	2,900	2,902
0,4453	0,4453	0,4250	0,4250	0,4110	0,4110
2,262	2,267	2,820	2,827	3,311	3,313
0,7110	0,7110	0,7724	0,7724	0,8121	0,8121
3,18	3,18	3,65	3,66	4,07	4,07
179 000	179 000	156 200	155 800	140 000	140 000
5,090	5,090	6,580	6,600	7,900	7,900
—0,206	—0,206	—0,203	—0,203	—0.201	—0,201
4,884	4,884	6,377	6,397	7,700	7,700
0,900	0,900	0,762	0,762	680	680
2,158	2,158	2,260	2,260	2,325	2,325
—1,258	—1,258	—1,498	—1,498	—1,645	—1,645
—225 000	—225 000	—234 000	—233 000	—230 000	—230 000
6,36	6,36	7,30	7,32	8,14	8,14
—6,39	—6,39	—9,85	—9,88	—13,00	—13,00
12,73	12,75	17,15	17,20	21,14	21,14
0,10	0,10	0,10	0,0692	0,0692	—
—	0,638	—	0,595	—	—
—	0,573	—	0,498	—	—
3,08	—	4,40	—	3,94	—
9,080	—	11,67	—	14,50	—
0,050	—	0,074	—	0,045	—
9,030	—	11,60	—	14,46	—
0,452	—	0,580	—	0,500	—

Таблица расчета давлений и скоростей при $\lambda > \lambda_k$

λ	2,900	3,000	4,000	5,000
$(0{,}412 + \lambda) = C$	3,311	3,411	4,411	5,411
$\lg C$	0,5201	0,5330	0,6446	0,7334
$\Theta \lg \eta$	0	$\bar{1}$,9974	$\bar{1}$,9751	$\bar{1}$,9573
$(1+\Theta) \lg \eta$	0	$\bar{1}$,9845	$\bar{1}$,8505	$\bar{1}$,7440
η^{Θ}	1	0,994	0,944	0,906
$\eta^{1+\Theta}$	1	0,965	0,709	0,555
p	1 400	1 350	993	776
β	0,8121	0,8070	0,766	0,736
$1-\beta$	0,1879	0,1930	0,234	0,264
$\sqrt{1-\beta}$	0,4335	0,4395	0,4840	0,5140
v_y	1 322	1 341	1 480	1 570

Таблица расчета удельных времен

$$\Delta t_y = \frac{\Delta\lambda}{v_i + \vartheta(n)\frac{\Delta v}{2}}, \quad \text{где} \quad \vartheta(n) = \frac{2}{3}\cdot\frac{n+2}{n+1}; \quad n = \frac{p_{i+1}}{p_i}$$

λ	$\Delta\lambda$	v_y	Δv_y	p	n	$\vartheta(n)$	$\vartheta(n)\frac{\Delta v}{2}$	Графы (3) + (8)	$\Delta t \cdot 10^5$	$t_y \cdot 10^5$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,0252	0	68,4	300	2,55	0,855	29,3	29,3	86,0	0
0,0252	0,0438	68,4	68,3	764	1,52	0,930	31,8	100,2	43,8	86,0
0,0690	0,1145	136,7	136,7	1 162	1,51	0.930	63,5	200,2	57,2	129,8
0,1835	0,1454	273,4	136,7	1 760	1,20	0,970	66,2	339,6	42,9	187,0
0,3289	0,1807	410.1	136,7	2 110	1,08	0,990	67,7	477,8	37,9	229,9
0,5096	0,2244	546,8	136,7	2 270	1,00	1,00	68,3	615,1	36,4	267,8
0,7340	0,2810	683,5	136,7	2 280	0,95	1,01	69,0	752,5	37 3	304,2
1,015	0,355	820,2	136,7	2 175	0,92	1,02	69.8	890,0	39.9	341,5
1,370	0,452	956,9	136,7	2 000	0,90	1,02	69,8	1 027	44,0	381,4
1.822	0,580	1 094	136.7	1 790	0,87	1,02	69,8	1 164	49,8	425,4
2,402	0,498	1 230	92	1 558	0,90	1,02	47,0	1 277	39,2	475,2
2.900	0,100	1 322	19	1 400	0,96	1,01	9,6	1 332	7,5	514,4
3,00	1,000	1 341	139	1 350	0,74	1,05	72,8	1 414	70.9	521,9
4,00	1,000	1 480	90	993	0,78	1,04	46.8	1 527	65,7	592,8
5,00	—	1 570	—	776	—	—	—	—	—	658,5

Приложение 3

ТАБЛИЦЫ ВАРИАЦИЙ МОДУЛЯ

Таблица 1

$k(p_1, p_2)$

p_1 \ p_2	0		0,1		0,2		0,3		0,4		0,5		0,6		0,7		0,8		0,9		1,0	
	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif
0	—0,500	125	—0,458	107	—0,429	96	—406	87	—0,389	80	—0,375	75	—0,364	71	—0,355	68	—0,346	65	—0,340	63	—0,333	60
0,1	375	89	351	79	333	72	319	67	309	63	300	60	293	58	287	56	281	53	277	52	273	51
0,2	286	67	272	62	261	57	252	53	246	51	240	49	235	47	231	47	228	45	225	44	222	43
0,3	219	52	210	48	204	46	199	44	195	42	191	41	188	40	184	39	183	38	181	37	179	36
0,4	167	42	162	40	158	38	155	37	153	36	150	34	148	34	145	33	145	33	144	32	143	32
0,5	125	34	122	33	120	32	118	31	117	31	116	30	114	29	112	28	112	28	112	28	111	28
0,6	91	29	89	28	88	27	87	26	86	26	86	26	85	25	84	24	84	25	84	25	83	24
0,7	62	24	61	23	61	23	61	23	60	22	60	22	60	22	60	22	59	22	59	22	59	21
0,8	38	20	38	20	38	20	38	20	38	20	38	20	38	20	38	20	37	19	37	19	38	20
0,9	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
1,0	0,000	100	0,000	102	0,000	104	0,000	105	0,000	106	0,000	107	0,000	108	0,000	109	0,000	110	0,000	111	0,000	111
2	100	43	102	45	104	46	105	48	106	50	107	51	108	52	109	53	110	54	111	54	111	56
3	143	24	147	25	150	27	153	28	156	28	158	29	160	30	162	31	164	32	165	33	167	33
4	167	15	172	16	177	17	181	17	184	19	187	20	190	20	193	21	196	21	198	22	200	22
5	182	10	188	11	194	11	198	13	203	13	207	13	210	15	214	14	217	15	220	15	222	16
6	192	8	199	8	205	9	211	9	216	10	220	11	225	10	228	11	232	11	235	12	238	12
7	200	6	207	6	214	7	220	7	226	8	231	8	235	8	239	9	243	9	247	9	250	9
8	206	5	213	5	221	5	227	5	234	5	239	6	243	7	248	7	252	7	256	7	259	7
9	211	4	218	5	226	4	232	5	239	5	245	5	250	6	255	6	259	6	263	6	266	6
10	215		223		230		237		244		250		256		261		265		269		272	

Продолжение таблицы 1 $k(p_1, p_2)$

p_1 \ p_2	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif
0	—0,333	60	—0,300	50	—0,286	46	—0,278	44	—0,274	43	—0,269	41	—0,267	41	—0,265	40	—0,263	39	—0,262	39
0,1	273	51	250	43	240	40	234	38	231	38	228	36	226	36	225	36	224	35	223	35
0,2	222	43	207	38	200	35	196	34	193	33	192	32	190	32	189	32	189	32	188	31
0,3	179	36	169	33	165	31	162	30	160	30	160	30	158	29	157	29	157	29	157	29
0,4	143	32	136	29	134	28	132	28	130	27	130	27	129	27	128	26	128	26	128	26
0,5	111	28	107	26	106	26	104	25	103	24	103	25	102	24	102	24	102	24	102	24
0,6	83	24	81	23	80	23	79	23	79	22	78	22	78	22	78	22	78	22	78	22
0,7	59	21	58	21	57	21	56	20	57	21	56	20	56	20	56	20	56	20	56	20
0,8	38	20	37	19	36	19	36	19	36	19	36	19	36	19	36	19	36	19	36	19
0,9	18	18	18	18	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
1,0	0,000	111	0,000	115	0,000	118	0,000	119	0,000	120	0,000	121	0,000	121	0,000	122	0,000	122	0,000	122
2	111	56	115	61	118	64	119	66	120	67	121	68	121	70	122	70	122	70	122	71
3	167	33	176	38	182	40	185	42	187	44	189	44	191	44	192	45	192	46	193	46
4	200	22	214	26	222	28	227	29	231	30	233	31	235	32	237	32	238	32	239	32
5	222	16	240	19	250	20	256	22	261	22	264	23	267	23	269	23	270	24	271	25
6	238	12	259	14	270	16	278	17	283	17	287	17	290	18	292	18	294	19	296	18
7	250	9	273	11	286	12	295	13	300	13	304	14	308	14	310	15	313	14	314	15
8	259	7	284	9	298	10	308	10	313	11	318	11	322	11	325	11	327	12	329	12
9	266	6	293	7	308	8	318	8	324	9	329	10	333	10	336	10	339	10	341	10
10	272		300		316		326		333		339		343		346		349		351	

Таблица 2 $k(p_1, p_2)$

p_1 \ p_2	0		−0,1		−0,2		−0,3		−0,4		−0,5		−0,6		−0,7		−0,8		−0,9		−1,0	
	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif
0	−0,500	125	−0,562	153	−0,667	205	−0,875	323	−1,500	750	∞	—	1,000	2,000	0,375	125	0,167	20	0,062	3	0	0
0,1	375	89	409	104	462	129	552	174	750	289	−1,500	0,833	3,000	−5,000	500	357	187	35	65	4	0	0
0,2	286	67	305	75	333	88	378	109	461	152	667	278	−2,000	1,364	857	9,643	222	70	69	5	0	0
0,3	219	52	230	57	245	63	269	75	309	95	389	139	636	303	10,500	−11,250	292	208	74	9	0	0
0,4	167	42	173	44	182	49	194	54	214	64	250	83	333	133	−0,750	0,450	500	—	83	17	0	0
0,5	125	34	129	36	133	38	140	41	150	46	167	56	200	75	300	142	∞	—	100	43	0	0
0,6	91	29	93	30	95	31	99	33	104	36	111	40	125	48	158	70	−0,333	208	143	357	0	0
0,7	62	24	63	24	64	25	66	26	68	27	71	29	77	33	88	41	125	69	500	−625	0	0
0,8	38	20	39	21	39	21	40	22	41	23	42	24	44	25	47	27	56	35	−125	100	0	0
0,9	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	19	19	20	20	21	21	— 25	25	0	0
1,0	0,000	100	0,000	98	0,000	95	0,000	92	0,000	88	0,000	83	0,000	77	0,000	68	0,000	55	0,000	38	0	0
2	100	43	98	40	95	38	92	35	88	32	83	28	77	23	68	18	55	12	38	2	0	0
3	143	24	138	23	133	21	127	19	120	16	111	14	100	11	86	8	67	4	40	2	0	0
4	167	15	161	14	154	13	146	11	136	10	125	8	111	7	94	4	71	3	42	0	0	0
5	182	10	175	9	167	9	157	8	146	7	133	6	118	4	98	3	74	2	42	1	0	0
6	192	8	184	8	176	6	165	6	153	5	139	4	122	3	101	3	76	1	43	1	0	0
7	200	6	192	5	182	5	171	4	158	4	143	3	125	2	104	1	77	1	44	0	0	0
8	206	5	197	4	187	4	175	3	162	2	146	2	127	2	105	1	78	0	44	0	0	0
9	211	4	201	4	191	3	178	3	164	2	148	2	129	1	106	1	78	1	44	0	0	0
10	215		205		194		181		166		150		130		107		79		44		0	0

Продолжение таблицы 2

$k(p_1, p_2)$

p_1 \ p_2	—1		—2		—3		—4		—5		—6		—7		—8		—9		—10	
	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif
0	0	0	—0,167	17	—0,200	23	—0,214	27	—0,224	30	—0,228	30	—0,231	31	—0,233	31	—0,235	32	—0,237	32
0,1	0	0	150	17	177	23	187	25	194	27	198	28	200	28	202	29	203	29	205	30
0,2	0	0	133	16	154	22	162	24	167	25	170	26	172	27	173	27	174	27	175	28
0,3	0	0	117	17	132	21	138	23	142	24	144	25	145	25	146	25	147	26	147	25
0,4	0	0	100	17	111	20	115	21	118	23	119	23	120	23	121	24	121	23	122	24
0,5	0	0	83	16	91	20	94	21	95	21	96	21	97	22	97	22	98	23	98	22
0,6	0	0	67	17	71	19	73	19	74	20	75	21	75	20	75	20	75	20	76	21
0,7	0	0	50	16	52	17	54	19	54	19	54	19	55	20	55	20	55	20	55	20
0,8	0	0	34	17	35	18	35	18	35	18	35	18	35	18	35	18	35	18	35	18
0,9	0	0	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
1,0	0	0	0,000	167	0,000	143	0,000	136	0,000	133	0,000	132	0,000	131	0,000	130	0,000	129	0,000	129
2	0	0	167	166	143	107	136	95	133	90	132	86	131	83	130	82	129	81	129	80
3	0	0	333	167	250	83	231	69	223	63	218	60	214	59	212	57	210	57	209	56
4	0	0	500	166	333	67	300	53	286	47	278	45	273	43	269	42	267	41	265	40
5	0	0	666	168	400	55	353	42	333	37	323	34	316	33	311	32	308	31	305	31
6	0	0	834	166	455	45	395	33	370	30	357	28	349	26	343	25	339	25	336	24
7	0	0	1,000	167	500	38	428	28	400	24	385	22	375	21	368	21	364	20	360	20
8	0	0	1,167	166	538	33	456	24	424	21	407	18	396	18	389	17	384	16	380	16
9	0	0	1,333	167	571	29	480	20	445	17	425	16	414	15	406	14	400	14	396	13
10	0	0	1,500		600		500		462		441		429		420		414		409	

Таблица 3

k_1 ($\varkappa$, p_2, p_3)

p_2 \ p_3	0		0,1		0,2		0,3		0,4		0,5		0,6		0,7		0,8		0,9		0,0	
	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif
0	0,200	24	0,213	20	0,220	19	0,227	17	0,232	16	0,236	15	0,240	14	0,243	14	0,246	13	0,248	13	0,250	12
0,1	224	20	233	17	239	16	244	15	248	14	251	13	254	13	257	12	259	11	261	11	262	11
0,2	244	17	250	15	255	14	259	13	262	13	264	12	267	11	269	10	270	10	272	10	273	10
0,3	261	15	265	14	269	13	272	12	275	11	276	11	278	10	279	10	280	10	282	9	283	9
0,4	276	13	279	12	282	11	284	10	286	10	287	10	288	9	289	9	290	9	291	9	292	8
0,5	289	11	291	11	293	10	294	9	296	9	297	9	297	9	298	8	299	8	300	8	300	8
0,6	300	10	302	10	303	9	303	9	305	8	306	7	306	8	306	8	307	7	308	7	308	7
0,7	310	9	312	8	312	8	312	8	313	7	313	7	314	7	314	7	314	7	315	7	315	7
0,8	319	8	320	7	320	7	320	7	320	7	320	7	321	6	321	6	321	6	322	6	322	6
0,9	327	7	327	6	327	6	327	6	327	6	327	6	327	6	327	6	327	6	328	5	328	5
1,0	334	44	333	45	333	44	333	44	333	43	333	43	333	43	333	43	333	42	333	42	333	42
2	378	22	378	22	377	23	377	23	376	24	376	24	376	24	376	24	375	25	375	25	375	25
3	400	13	400	14	400	14	400	15	400	15	400	16	400	16	400	16	400	16	400	17	400	17
4	413	9	414	9	414	10	415	10	415	10	416	10	416	11	416	11	416	11	417	12	417	12
5	422	7	423	7	424	8	425	7	425	8	426	8	427	8	427	8	427	9	429	8	429	8
6	429	5	430	5	432	5	432	6	433	6	434	6	435	6	435	7	436	7	437	6	437	7
7	434	3	435	4	437	4	438	4	439	5	440	5	441	5	442	5	443	5	443	6	444	6
8	437	2	439	3	441	3	442	3	444	4	445	4	446	4	447	4	448	4	449	5	450	5
9	439	2	442	2	444	2	445	3	448	3	449	3	450	3	451	4	452	4	454	4	455	4
10	441		444		446		448		451		452		453		455		456		458		459	

Продолжение таблицы 3 $k_1(\infty, p_2, p_3)$

p_2 \ p_3	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif
0	0,250	12	0,261	10	0,267	8	0,270	8	0,271	8	0,273	8	0,274	7	0,275	7	0,275	7	0,275	7
0,1	262	11	271	9	275	8	278	8	279	8	281	7	281	7	282	7	282	7	282	7
0,2	273	10	280	8	283	8	286	7	287	7	288	6	288	7	289	6	289	6	289	6
0,3	283	9	288	8	291	7	293	7	294	6	294	6	295	6	295	6	295	6	295	6
0,4	292	8	296	7	298	7	300	6	300	6	300	6	301	6	301	6	301	6	301	6
0,5	300	8	303	7	305	6	306	6	306	6	306	6	307	6	307	6	307	6	307	6
0,6	308	7	310	6	311	6	312	6	312	6	312	6	313	5	313	5	313	5	313	6
0,7	315	7	316	6	317	6	318	5	318	5	318	5	318	5	318	5	318	5	319	5
0,8	322	6	322	6	323	5	323	5	323	5	323	5	323	5	323	5	323	5	324	5
0,9	328	5	328	5	328	5	328	5	328	5	328	5	328	5	328	5	328	5	329	4
1,0	333	42	333	41	333	40	333	40	333	40	333	40	333	39	333	39	333	39	333	39
2	375	25	374	26	373	27	373	27	373	27	373	27	372	28	372	28	372	28	372	28
3	400	17	400	18	400	19	400	20	400	20	400	20	400	21	400	21	400	21	400	21
4	417	12	418	14	419	14	420	15	420	15	420	16	421	16	421	16	421	16	421	16
5	429	8	432	10	433	11	435	11	435	12	436	13	437	12	437	12	437	13	437	13
6	437	7	442	8	444	9	446	9	447	10	449	10	449	10	449	10	450	11	450	11
7	444	6	450	7	453	7	455	8	457	8	459	8	459	9	459	9	461	9	461	9
8	450	5	457	6	460	6	463	7	465	7	467	7	468	7	468	8	470	7	470	8
9	455	4	463	5	466	6	470	6	472	6	474	6	475	6	476	7	477	6	478	7
10	459		468		472		476		478		480		481		483		483		485	

Таблица 4

$k_1(\infty, p_2, p_3)$

p_2 \ p_3	0		—0,1		—0,2		—0,3		—0,4		—0,5		—0,6		—0,7		—0,8		—0,9		—1,0	
	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif
0	0,200	24	0,184	29	0,160	36	0,120	51	0,040	84	—0,200	213	∞	—	0,760	0,285	0,520	28	0,440	5	0,400	0
0,1	224	20	213	24	196	29	171	37	124	55	0,013	107	—0,566	499	1,045	3,555	548	52	445	7	400	0
0,2	244	17	237	19	225	23	208	28	179	39	120	64	67	167	4,600	—5,053	600	118	452	10	400	0
0,3	261	15	256	16	248	19	236	23	218	29	184	43	0,100	83	—0,453	0,482	718	549	462	17	400	0
0,4	276	13	272	14	267	15	259	18	247	23	227	30	183	51	0,029	140	—267	—467	479	32	400	0
0,5	289	11	286	12	282	13	277	15	270	18	257	23	234	33	169	67	—0,200	300	511	89	400	0
0,6	300	10	298	10	295	12	292	13	288	14	280	18	267	24	236	40	0,100	130	600	1,333	400	0
0,7	310	9	308	9	307	10	305	11	302	12	298	14	291	18	276	27	230	54	1,933	—1,777	400	0
0,8	319	8	317	8	317	9	316	9	314	10	312	11	309	13	303	17	284	30	156	136	400	0
0,9	327	7	325	8	326	8	325	8	324	9	323	10	322	11	320	13	314	19	292	41	400	0
1,0	334	44	333	45	334	45	333	47	333	48	333	49	333	50	333	52	333	55	333	59	400	0
2	378	22	378	22	379	21	380	20	381	19	382	18	383	17	385	15	388	12	392	8	400	0
3	400	13	400	13	400	12	400	12	400	11	400	10	400	9	400	7	400	5	400	3	400	0
4	413	9	413	8	412	8	412	7	411	7	410	6	409	5	407	4	405	3	403	2	400	0
5	422	7	421	6	420	6	419	5	418	4	416	4	414	3	411	3	408	2	405	1	400	0
6	429	5	427	5	426	4	424	4	422	3	420	3	417	2	414	2	410	1	406	0	400	0
7	434	3	432	4	430	3	428	3	425	3	423	2	419	2	416	1	411	1	406	1	400	0
8	437	2	436	3	433	2	431	2	428	2	425	1	421	1	417	1	412	1	407	0	400	0
9	439	2	439	2	435	2	433	2	430	1	426	1	422	1	418	1	413	1	407	0	400	0
10	441		441		437		435		431		427		423		419		414		407		400	0

Окончание таблицы 4

$k_1(\infty, p_2, p_3)$

p_2 \ p_3	—1		—2		—3		—4		—5		—6		—7		—8		—9		—10	
	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif	k	Dif
0	0,400	0	0,314	2	0,300	3	0,293	5	0,291	5	0,289	5	0,288	5	0,287	5	0,286	5	0,285	6
0,1	400	0	316	2	303	4	298	5	296	5	294	5	293	5	292	5	291	5	291	5
0,2	400	0	318	2	307	3	303	4	301	4	299	4	298	4	297	5	296	5	296	5
0,3	400	0	320	1	310	3	307	3	305	4	303	5	302	5	302	5	301	5	301	5
0,4	400	0	321	2	313	4	310	4	309	4	308	4	307	5	307	4	306	5	306	5
0,5	400	0	323	2	317	3	314	4	313	4	312	5	312	4	311	5	311	5	311	4
0,6	400	0	325	2	320	3	318	4	317	4	317	4	316	5	316	4	316	4	315	5
0,7	400	0	327	2	323	4	322	3	321	4	321	4	321	4	320	5	320	5	320	5
0,8	400	0	329	2	327	3	325	5	325	4	325	4	325	4	325	4	325	4	325	4
0,9	400	0	331	2	330	3	330	3	329	4	329	4	329	4	329	4	329	4	329	4
1,0	400	0	333	27	333	34	333	36	333	36	333	37	333	37	333	37	333	37	333	37
2	400	0	360	40	367	33	369	31	369	31	370	30	370	30	370	30	370	30	370	30
3	400	0	400	67	400	33	400	29	400	27	400	26	400	25	400	25	400	24	400	24
4	400	0	467	133	433	34	429	26	427	23	426	22	425	21	425	20	424	20	424	20
5	400	0	600	400	467	33	455	23	450	21	448	19	446	18	445	18	444	18	444	17
6	400	0	1,000	—	500	33	478	22	471	18	467	16	464	16	463	15	462	14	461	14
7	400	0	∞	—	533	34	500	20	489	16	483	15	480	14	478	13	476	13	475	12
8	400	0	−0,600	400	567	33	520	18	505	15	498	13	494	12	491	11	489	11	487	11
9	400	0	200	133	600	34	538	17	520	13	511	12	506	11	502	10	500	10	498	10
10	400	0	067		634		555		533		523		517		512		510		508	

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИГУРНЫХ ЧАСТЕЙ СНАРЯДА ПО ФОРМУЛАМ КВАДРАТУР ЭЙЛЕРА и проф. Е. Л. БРАВИНА

1. Расчет характеристик оживальной части снаряда по формулам квадратур Эйлера

Применим двучленную формулу Эйлера (53) к расчету характеристик оживальной части снаряда (рис. 102).

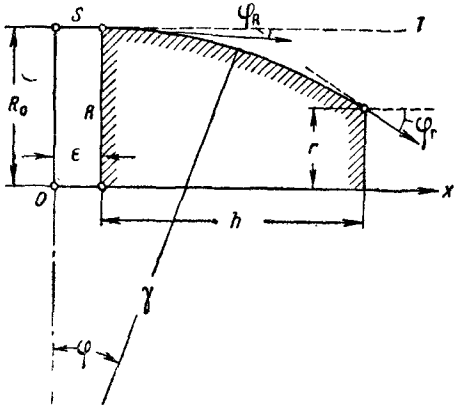


Рис. 102. Очертание оживальной части снаряда.

Обозначим:

γ — радиус, которым очерчено сечение оживала;

ε — смещение центра окружности от основания головной части к дну снаряда;

R — радиус у основания головной части;

r — радиус у вершины;

$\rho = \dfrac{r}{R}$ — их отношение;

h — высота оживальной части (по оси снаряда).

Связь между радиусом кривизны γ, смещением ε, углом φ и координатой x от основания оживальной части определяется равенством:

$$\gamma \cdot \sin\varphi = x + \varepsilon.$$

Уменьшение радиусов произвольных точек оживала

$$\Delta r = \gamma(\cos\varphi_R - \cos\varphi).$$

Переменный радиус точки оживальной части с координатой x

$$r_i = R - \Delta r = R - \gamma(\cos\varphi_R - \cos\varphi).$$

Для вычисления квадратур найдем еще производную $\dot{r}$:

$$dr = -\gamma \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi;$$

$$dx = \gamma \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi.$$

Отсюда

$$\dot{r}=\frac{dr}{dx}=-\operatorname{tg}\varphi.$$

Расчетные формулы получим на основании двучленной формулы квадратур Эйлера:

$$\int_0^h y\,dx=\left[y_2+y_1-\frac{h}{6}(\dot{y}_2-\dot{y}_1)\right]\frac{h}{2}.$$

1. Объем

$$\Delta w=\pi\int_0^h r_i^2\,dx=\alpha\pi R^2h;$$

$$y=r_i^2;\quad \dot{y}=-2r_i\cdot\operatorname{tg}\varphi;$$

$$\Delta w=\pi\left[r^2+R^2+\frac{1}{3}(r\cdot\operatorname{tg}\varphi_r-R\cdot\operatorname{tg}\varphi_R)\,h\right]\frac{h}{2}=$$

$$=\frac{1}{2}\left[\rho^2+1+\frac{1}{3}(\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r-\operatorname{tg}\varphi_R)\frac{h}{R}\right]\pi R^2h.$$

Следовательно,

$$\alpha=\frac{1}{2}\left[\rho^2+1+\frac{1}{3}(\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r-\operatorname{tg}\varphi_R)\frac{h}{R}\right].$$

2. Координата центра тяжести (относительно большого основания)

$$\xi_c=\frac{1}{\Delta w}\pi\int_0^h xr_i^2\,dx=\beta\frac{h}{2};$$

$$y=xr_i^2;\quad \dot{y}=r_i^2-2xr_i\cdot\operatorname{tg}\varphi;$$

$$\xi_c=\frac{1}{\alpha}\left[\rho^2+\frac{1}{6}\left(1-\rho^2+2\frac{h}{R}\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r\right)\right]\frac{h}{2}.$$

Отсюда

$$\beta=\frac{1}{\alpha}\left[\rho^2+\frac{1}{6}\left(1-\rho^2+2\frac{h}{R}\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r\right)\right].$$

3. Квадрат радиуса полярного момента инерции

$$\rho_0^2=\frac{1}{\Delta w}\cdot\frac{\pi}{2}\int r_i^4\,dx=\mu_0R^2;$$

$$y=r_i^4;\quad \dot{y}=-4r_i^3\cdot\operatorname{tg}\varphi;$$

$$\rho_0^2=\frac{1}{4\alpha}\left[\rho^4+1+\frac{2}{3}(\rho^3\cdot\operatorname{tg}\varphi_r-\operatorname{tg}\varphi_R)\frac{h}{R}\right]R^2;$$

$$\mu_0=\frac{1}{4\alpha}\left[\rho^4+1+\frac{2}{3}(\rho^3\cdot\operatorname{tg}\varphi_r-\operatorname{tg}\varphi_R)\frac{h}{R}\right],$$

4. Квадрат радиуса собственного плоскостного момента инерции

$$\rho_1^2 = \frac{1}{\Delta w}\pi \int_0^h x^2 r_i^2\, dx - \xi_c^2 = \nu_0 \left(\frac{h}{2}\right)^2;$$

$$y = x^2 r_i^2; \quad \dot{y} = 2x r_i^2 - 2x^2 r_i \cdot \operatorname{tg}\varphi;$$

$$\rho_1^2 = \frac{1}{2\alpha}\left[h^2\rho^2 - \frac{1}{3}\left(h\rho^2 - \frac{h^2}{R}\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r\right)h\right] - \xi_c^2 =$$

$$= \frac{2}{\alpha}\left[\rho^2 - \frac{1}{3}\left(\rho^2 - \frac{h}{R}\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r\right)\right]\left(\frac{h}{2}\right)^2 - \xi_c^2.$$

Отсюда находим

$$\nu_0 = \frac{2}{\alpha}\left[\rho^2 - \frac{1}{3}\left(\rho^2 - \frac{h}{R}\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r\right)\right] - \beta^2.$$

Пример. Рассчитать характеристики оживальной части снаряда при следующих данных:

$h = 2{,}6$ *см*; $\rho = \dfrac{r}{R} = 0{,}784$;

$r = 0{,}90$ *см*; $\operatorname{tg}\varphi_r = 0{,}1800$;

$R = 1{,}149$ *см*; $\operatorname{tg}\varphi_R = 0{,}0127$.

Для удобства дальнейших выкладок рассчитываем сначала вспомогательные величины:

$\rho^2 = 0{,}614$; $\rho^3 = 0{,}481$; $\rho^4 = 0{,}377$;

$\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r = 0{,}141$; $2\dfrac{h}{R}\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r = 0{,}639$; $\rho^3\cdot\operatorname{tg}\varphi_r = 0{,}0865$;

$\dfrac{h}{R} = 2{,}263$; $\dfrac{h}{R}\rho\cdot\operatorname{tg}\varphi_r = 0{,}320$; $\left(\dfrac{h}{2}\right)^2 = 1{,}690$.

Кроме того, имеем:

$$\pi R^2 h = 10{,}80 \text{ } см^2.$$

1. Объем

$$\alpha = \frac{1}{2}\left[1{,}614 + \frac{1}{3}(0{,}1410 - 0{,}0127)\cdot 2{,}263\right] =$$

$$= \frac{1}{2}(1{,}614 + 0{,}097) = 0{,}855;$$

$$\Delta w = 9{,}24 \text{ } см^3.$$

2. Координата центра тяжести

$$\beta = \frac{1}{0{,}855}\left[0{,}614 + \frac{1}{6}(0{,}386 + 0{,}639)\right] = 0{,}920;$$

$$\xi_c = 1{,}20 \text{ } см.$$

3. Квадрат радиуса полярного момента инерции

$$\mu_0 = \frac{1}{3{,}420}\left[1{,}377 + \frac{2}{3}(0{,}0865 - 0{,}0127)\cdot 2{,}263\right] =$$

$$= \frac{1}{3{,}420}[1{,}377 + 0{,}111] = 0{,}435;$$

$$\rho_0^2 = 0{,}572\ см^2.$$

4. Квадрат радиуса собственного плоскостного момента инерции

$$\nu_0 = \frac{2}{0{,}855}\left[0{,}614 - \frac{1}{3}(0{,}614 - 0{,}320)\right] - 0{,}92^2 =$$

$$= 1{,}207 - 0{,}847 = 0{,}360;$$

$$\rho_1^2 = 0{,}610\ см^2.$$

В этом примере значение коэфициента ν_0 последней характеристики явно неверно, так как оно оказалось бо́льшим, чем для цилиндра: $\nu_0 = 0{,}333$, чего быть не может.

Переходить к трехчленной формуле не имеет смысла, так как пришлось бы подняться до третьей производной от подинтегральной функции. Это привело бы к довольно сложным выражениям, так как формула Эйлера содержит лишь нечетные производные, а четные производные нисколько не влияют на ее точность.

Если бы не имелось таблицы 8 коэфициентов α, β, μ_0 и ν_0, то ошибка, даваемая двучленной формулой Эйлера, могла бы остаться незамеченной. В этом смысле таблица 1 является прекрасным средством для контроля вычислений. Но контроль правильности вычислений можно осуществить и иными способами. Для этого проще всего, разделив основание $b - a = h$ на n равных частей, рассчитать характеристики по общеизвестному правилу трапеций, погрешность которого выражается так [1]:

$$R = -\frac{1}{12}\cdot\frac{h^3}{n^2}\ddot{f}(\eta_1), \quad \text{где } a < \eta < b.$$

Расчет, проделанный нами по правилу трапеций, при $n = 10$ дал значения коэфициентов:

$$\alpha = 0{,}857; \quad \Delta w = 9{,}27\ см^2;$$
$$\beta = 0{,}920; \quad \xi_c \approx 1{,}20\ см;$$
$$\mu_0 = 0{,}436; \quad \rho_0^2 = 0{,}576\ см^2;$$
$$\nu_0 = 0{,}325; \quad \rho_1^2 = 0{,}550\ см^2,$$

которые, повидимому, близки к истине.

Сравнивая эти значения с полученными выше, приходим к заключению, что двучленная формула Эйлера позволяет рас-

[1] Акад. А. Н. Крылов, Лекции о приближенных вычислениях, изд. Академии наук СССР, 1933, стр. 121.

считывать первые три характеристики с хорошими результатами. Что же касается четвертой характеристики, то здесь ошибка в +10% в собственном, да еще только в плоскостном моменте инерции, уменьшающаяся в полтора раза для собственного экваториального момента инерции, никакой практической роли не играет.

2. Распространение метода проф. Бравина на вычисление некоторых видов квадратур, относящихся к расчетам динамических характеристик

При расчетах динамических характеристик отдельных элементов снаряда этим методом обозначим:

x — направление координатной оси от плоскости большего основания фигуры к малому основанию;

z — обратное направление координатной оси;

$S(z)$ — площадь поперечного сечения фигуры;

$w(z)$ — объем части фигуры в промежутке от 0 до z;

h — полная высота фигуры.

Напишем квадратуру, выражающую момент объема относительно большого основания, т. е. относительно верхнего предела интегрирования. На основании формулы (57) имеем:

$$M = \int_0^h w(z)\,dz = \int_0^h \int_0^z S(z)\,dz\,dz =$$

$$= h \int_0^h S(z)\,dz - \int_0^h z \cdot S(z)\,dz;$$

$$M = hw - z_c w = (h - z_c)\,w = \vartheta(n,\ m)\,\frac{w}{2}\,h, \qquad (A)$$

где z_c — координата центра тяжести относительно малого основания;

$\vartheta(n, m)$ — модуль функции $\dot{w}(z) = S(z)$;

$n = \mathrm{rat}\,[S(z)]_r^R$;

$m = \mathrm{rat}\,[\dot{S}(z)]_r^R$ и т. д.

Формулу (А) можно рассматривать как прием вынесения из-под знака интеграла функции $w(z)$ ее средним значением. Отсюда простыми преобразованиями получаем:

$$\int_0^h z\,S(z)\,dz = z_c\,w = \left[h - \vartheta(n, m)\,\frac{h}{2}\right] w = [2 - \vartheta(n, m)]\,\frac{h}{2}\,w =$$

$$= [1 + k(n, m)]\,\frac{h}{2}\,w = \theta(\nu, \mu)\,\frac{h}{2}\,w. \qquad (B)$$

Формула (B), очевидно, представляет собой прием вынесения из-под знака интеграла множителя z его средним значением. Координата центра тяжести от плоскости большого основания найдется по формуле

$$x_c = h - z_c = \vartheta(n, m)\frac{h}{2}. \tag{C}$$

На основании формулы (B) имеем:

$$z_c = \theta(\nu, \mu)\frac{h}{2}, \tag{D}$$

где $\theta(\nu, \mu)$ — модуль функции $S(z)$;

$$\nu = \mathrm{rat}\left[S(z)\right]_R^r;$$

$$\mu = \mathrm{rat}\left[\dot{S}(z)\right]_R^r \text{ и т. д.}$$

Распространяя этот прием на более сложные виды квадратур, получаем возможность вычислять плоскостные моменты инерции

$$\int_0^h z^2 S(z)\,dz = \int_0^h z\,[z\,S(z)]\,dz =$$

$$= \theta_1(\nu_1, \mu_1)\frac{h}{2}\int_0^h z\,S(z)\,dz = \theta_1\theta\left(\frac{h}{2}\right)^2 w,$$

где $\theta_1(\nu_1, \mu_1)$ — модуль моментной функции $z\,S(z) = Y(z)$;

$$\nu_1 = \mathrm{rat}\left[Y(z)\right]_R^r;$$

$$\mu_1 = \mathrm{rat}\left[\dot{Y}(z)\right]_R^r \text{ и т. д.}$$

Отсюда собственный плоскостной момент инерции фигуры относительно плоскости, проходящей через центр тяжести, определится так:

$$I = \theta_1\theta\left(\frac{h}{2}\right)^2 w - z_c^2\,w = (\theta_1\theta - \theta^2)\left(\frac{h}{2}\right)^2 w =$$

$$= (\theta_1 - \theta)\,\theta\left(\frac{h}{2}\right)^2 w,$$

а квадрат радиуса собственного плоскостного момента инерции

$$\rho_1^2 = (\theta_1 - \theta)\,\theta\left(\frac{h}{2}\right)^2 = (\varkappa - \varkappa_1)(1 - \varkappa)\left(\frac{h}{2}\right)^2 =$$

$$= (k_1 - k)(1 + k)\left(\frac{h}{2}\right)^2. \tag{E}$$

3. Расчет характеристик оживальной части снаряда по методу проф. Бравина

Для того чтобы все наши подинтегральные функции были монотонными, направим ось координат z противоположно оси x, так что

$$dz = -\gamma \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi;$$

$$\dot{r} = \frac{dr}{dz} = \operatorname{tg}\varphi,$$

и далее

$$\frac{d}{dz}(\operatorname{tg}\varphi) = -\frac{1}{\gamma \cos^3\varphi};$$

$$\frac{d}{dz}(r_i \cdot \operatorname{tg}\varphi) = \operatorname{tg}^2\varphi - \frac{r_i}{\gamma} \cdot \frac{1}{\cos^3\varphi} = \operatorname{tg}^2\varphi\left(1 - \frac{r_i}{\gamma \cdot \sin^2\varphi \cdot \cos\varphi}\right) =$$

$$= \operatorname{tg}^2\varphi\,(1-\chi),$$

где для краткости обозначено:

$$\chi = \frac{r_i}{\gamma \cdot \sin^2\varphi \cdot \cos\varphi}.$$

Наконец,

$$\frac{d}{dz}(r_i^3 \cdot \operatorname{tg}\varphi) = 3r_i^2 \cdot \operatorname{tg}^2\varphi - \frac{r_i^3}{\gamma \cdot \cos^3\varphi} = r_i^2 \cdot \operatorname{tg}^2\varphi\left(3 - \frac{r_i}{\gamma \cdot \sin^2\varphi \cdot \cos\varphi}\right) =$$

$$= r_i^2 \cdot \operatorname{tg}^2\varphi\,(3-\chi).$$

1. Объем

$$\Delta w = \pi \int_0^h r_i^2\, dz = \alpha\pi R^2 h,$$

или

$$\Delta w = \pi\left[r^2 + \vartheta(m,s)\frac{R^2 - r^2}{2}\right]h = \left[\rho^2 + \vartheta(m,s)\frac{1-\rho^2}{2}\right]\pi R^2 h,$$

причем

$$\alpha = \rho^2 + \vartheta(m,s)\frac{1-\rho^2}{2};$$

$$m = \operatorname{rat}(r_i \cdot \operatorname{tg}\varphi)_r^R = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\operatorname{tg}\varphi_R}{\operatorname{tg}\varphi_r};$$

$$s = \operatorname{rat}[\operatorname{tg}^2\varphi\,(1-\chi)]_r^R.$$

Модуль $\vartheta(m,s)$ составляется по формуле (60), где вместо параметра n ставится m, а вместо m — параметр s, или же берется из таблиц вариаций модуля $k(p_1,p_2)$, где p_1 — первый параметр, а p_2 — второй параметр (см. приложение 3), так что

$$\vartheta(m,s) = 1 - k(m,s).$$

2. Координата центра тяжести относительно плоскости большого основания

$$\xi_c = \frac{1}{\Delta w}\pi \int_0^h \int_0^z r_i^2\, dz = \beta \frac{h}{2},$$

или

$$\xi_c = \vartheta(n, m)\frac{h}{2};$$

следовательно,

$$\beta = \vartheta(n, m) = 1 - k(n, m);$$

$$n = \operatorname{rat}(r_i^2)_r^R = \frac{1}{\rho^2};$$

m — то же, что и выше.

3. Квадрат радиуса полярного момента инерции

$$\rho_0^2 = \frac{1}{\Delta w} \cdot \frac{\pi}{2} \int_0^h r_i^4\, dz = \mu_0 R^2,$$

или

$$\rho_0^2 = \frac{1}{\Delta w} \cdot \frac{\pi}{2}\left[r^4 + \vartheta(m_0, s_0)\frac{R^4 - r^4}{2}\right]h =$$

$$= \frac{1}{2\alpha}\left[\rho^4 + \vartheta(m_0, s_0)\frac{1-\rho^4}{2}\right]R^2.$$

Отсюда

$$\mu_0 = \frac{1}{2\alpha}\left[\rho^4 + \vartheta(m_0, s_0)\frac{1-\rho^4}{2}\right];$$

$$m_0 = \operatorname{rat}(r_i^3 \cdot \operatorname{tg}\varphi)_r^R = \frac{m}{\rho^2};$$

$$s_0 = \operatorname{rat}[r_i^2 \cdot \operatorname{tg}^2\varphi(3-\chi)]_r^R = m^2 \cdot \operatorname{rat}(3-\chi)_r^R.$$

4. Квадрат радиуса собственного плоскостного момента инерции

$$\rho_1^2 = \frac{1}{\Delta w}\left[\pi \int_0^h z^2 r_i^2\, dz\right] - \zeta_c^2 = \nu_0\left(\frac{h}{2}\right)^2,$$

где

$$\nu_0 = (\theta_1 - \theta)\theta = (k_1 - k)(1 + k).$$

Приближение второй степени точности:

$k = 1 - \vartheta(n, m) = k(n, m)$ — известная величина по п. 2;

$$k_1 = k_1(n_1, m_1)_{n_1 \to \infty} = 0{,}5\,\frac{m_1 + 1}{m_1 + 2};$$

$$n_1 = \mathrm{rat}\,(zr_i^2)_r^R = \infty;$$

$$m_1 = \mathrm{rat}\,(r_i^2 + 2zr_i \cdot \mathrm{tg}\,\varphi)_r^R = \frac{1}{\rho^2}\left(1 + 2\,\frac{h}{R}\,\mathrm{tg}\,\varphi_R\right).$$

Приближение третьей степени точности:

$$k_1(\infty, m_1, s_1) = \frac{0{,}60\,(m_1 s_1 + 1) + 1{,}40\,(m_1 + s_1)}{s_1\,(m_1 + 5) + 3\,(m_1 + 1)}$$

берется из таблицы приложения 3 по параметру m_1 и следующему за ним параметру

$$s_1 = \mathrm{rat}\,[2r_i \cdot \mathrm{tg}\,\varphi + z \cdot \mathrm{tg}^2\varphi\,(1-\chi)]_r^R = m\left[1 + 0{,}5\,\frac{h}{R}\,\mathrm{tg}\,\varphi_R\,(1-\chi_R)\right].$$

Пример. Рассчитать характеристики оживальной части снаряда при следующих данных, отвечающих предыдущему примеру:

$h = 2{,}6$ *см*; $\gamma = 15{,}75$ *см*; $\varepsilon = 0{,}200$ *см*;

$r = 0{,}90$ *см*; $\mathrm{tg}\,\varphi_r = 0{,}1800$; $\rho = \dfrac{r}{R} = 0{,}784$;

$R = 1{,}149$ *см*; $\mathrm{tg}\,\varphi_R = 0{,}0127$; $\pi R^2 h = 10{,}80$ *см*^{3}.

Определим некоторые вспомогательные величины:

r_i	φ	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	χ	$1-\chi$	$3-\chi$
r	10°13′	0,1777	0,9840	1,840	—0,840	1,160
R	0°43′	0,0127	0,9998	452	—451	—449

1. Объем

$$m = \mathrm{rat}\,(r_i \cdot \mathrm{tg}\,\varphi)_r^R = 0{,}090;$$

$$s = \mathrm{rat}\,[\mathrm{tg}^2\varphi\,(1-\chi)]_r^R = 2{,}67;$$

$$k(m, s) = -0{,}247; \quad \vartheta(m, s) = 1{,}247;$$

$$\alpha = \rho^2 + \vartheta\,\frac{1-\rho^2}{2} = 0{,}614 + 0{,}241 = 0{,}855;$$

$$\Delta w = \alpha\pi R^2 h = 9{,}24\ \text{см}^3.$$

2. Координата центра тяжести

$$n = \mathrm{rat}\,(r_i^2)_r^R = 1{,}630; \quad m = 0{,}090;$$

$$k(n, m) = 0{,}075;$$

$$\vartheta(n, m) = 1 - k(n, m) = 0{,}925 = \beta;$$

$$\xi_c = \beta\,\frac{h}{2} = 0{,}925 \cdot 1{,}30 = 1{,}20\ \text{см}.$$

3. Квадрат радиуса полярного момента инерции

$$m_0 = \frac{m}{\rho^2} = 0{,}1464;$$

$$s_0 = m^2 \cdot \mathrm{rat}\,(3-\chi)_r^R = -3{,}14; \quad \vartheta(m_0, s_0) = 1{,}168;$$

$$\mu_0 = \frac{1}{2\alpha}\left[\rho^4 + \vartheta\frac{1-\rho^4}{2}\right] = 0{,}585\,(0{,}377 + 0{,}364) = 0{,}434;$$

$$\rho_0^2 = \mu_0 R^2 = 0{,}434 \cdot 1{,}320 = 0{,}572\ см^2.$$

4. Квадрат радиуса собственного плоскостного момента инерции.

Приближение второй степени точности:

$$n_1 = \mathrm{rat}\,(zr_i^2)_r^R = \infty;$$

$$m_1 = \frac{1}{\rho^2}\left(1 + 2\frac{h}{R}\operatorname{tg}\varphi_R\right) = 1{,}723;$$

$$k_1 = 0{,}5\frac{m_1+1}{m_1+2} = 0{,}366;$$

$$\nu_0 = (k_1 - k)(1+k) = 0{,}291 \cdot 1{,}075 = 0{,}313;$$

$$\rho_1^2 = \nu\left(\frac{h}{2}\right)^2 = 0{,}530\ см^2.$$

Приближение третьей степени точности:

$$s_1 = m\left[1 + 0{,}5\frac{h}{R}\operatorname{tg}\varphi_R(1-\chi_R)\right] = -0{,}493;$$

$$k_1 = k_1(\infty, m_1, s_1) = 0{,}373;$$

$$\nu_0 = 0{,}298 \cdot 1{,}075 = 0{,}321;$$

$$\rho_1^2 = 0{,}542\ см^2.$$

Из этого примера видно, что значения трех первых характеристик, рассчитанных по методу проф. Бравина, совпадают в пределах точности вычислений с теми же характеристиками, рассчитанными по двучленной формуле Эйлера.

Последняя же характеристика отличается от истинной на —4% в первом, более грубом варианте расчета и на —1% во втором варианте расчета повышенной точности (вместо +10% по двучленной формуле Эйлера), причем значение ν_0 в обоих случаях получается меньше, чем для цилиндра, как это и должно быть.

По степени сложности расчеты почти эквивалентны. Это объясняется тем, что метод проф. Бравина допускает пользование заранее составленными таблицами вариаций модуля k.

Приложение 5

ТАБЛИЦЫ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ АВТОМАТИКИ

t/b_1	1,275	1,5		2,0	
$t \cdot 10^3$ сек.	0,97	1,14		1,52	
$p(t)$	188	164	164	113	—
$\ddot{y}$	730	729	729	720	—
w, *м/сек*	0	0,124	0,124	0,400	—
y, *мм*	0	0,011	0,011	0,110	—
u, *м/сек*	9,20	10,41	10,32	12,63	12,21
$0{,}08w$	0	0,01	0,01	0,03	—
$0{,}15u$	1,38	1,56	1,55	1,90	—
$A = w + 0{,}15u$	1,38	1,68	1,67	2,30	—
$B = u - 0{,}08w$	9,20	10,40	10,31	12,60	—
$\psi = \frac{A}{B}$	0,150	0,162	0,162	0,183	—
$-L(t)$	219	219	219	217	—
x, *мм*	5,00	6,67	6,66	11,02	10,97
$kx = 0{,}0775x$	0.39	0,52	0,52	0,85	—
$8{,}00 + kx$	8,39	8,52	8,52	8,85	—
$-\psi L$	32,8	35,5	35,5	39,6	—
Σ_1	41,2	44,0	44,0	48,5	—
S, *см²*	2,54	2,54	2,54	2,54	—
$P = p(t)S$	478	417	417	287	—
$P - \Sigma_1$	436,8	373,0	373,0	238,5	—
M	0,0615	0,0615	0,0615	0,0615	—
$\ddot{x} = \frac{P - \Sigma_1}{M}$	7 100	6 070	6 070	3 880	—
$\Delta t \cdot 10^3$ сек.	0,17	0,17	0,38	0,38	—
1) $\Delta u = \ddot{x}_i \Delta t$	1,21	—	2,31	—	—
$\Delta x = \left(u_i + \frac{\Delta u}{2}\right)\Delta t$	1,67	—	4,36	—	—
2) $\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_i$	—	13 170	—	9 950	—
$\Delta u = (\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_i)\frac{\Delta t}{2}$	—	1,12	—	1,89	—
$n = \ddot{x}_i : \ddot{x}_{i-1}$	—	0,86	—	0,64	—
$\vartheta(n) = \frac{2}{3} \cdot \frac{n+2}{n+1}$	—	1,03	—	1,07	—
$\delta u = \vartheta(n)\frac{\Delta u}{2}$	—	0.58	—	1,02	—
$\Delta x = (u_{i-1} + \delta u)\Delta t$	—	1,66	—	4,31	—

—	2,5		3,0		—
1,60	1,90		2,28		2,12
103	74	74	48	—	57
718	708	708	685	—	695
0,46 / 0,37	0,584	0,584	0,848	—	0,740 / 0,570
0,135	0,278	0,278	0,550	—	0,430
12,50 / 10,02	10,88	10,72	11,41	11,23	11,05 / 8,50
0,03	0,05	0,05	0,07	—	0,05
1,50	1,63	1,61	1,71	—	1,28
1,87	2,21	2,19	2,56	—	1,85
9,99	10,83	10,67	11,34	—	8,45
0,187	0,204	0,205	0,226	—	0,219
216	213	213	207	—	209
12,00	15,13	15,12	19,32	19,32	17,5
0,93	1,17	1,17	1,50	—	1,36
8,93	9,17	9,17	9,50	—	9,36
40,4	43,5	43,7	46,7	—	45,7
49,3	52,7	52,9	56,2	—	55,1
2,54	2,54	2,54	2,54	—	3,82
262	188	188	122	—	218
212,7	135,3	135,1	65,8	—	162,9
0,0745	0,0745	0,0745	0,0745	—	0,0851
2 860	1 820	1 815	884	—	1 914
0,30	0,30	0,38	0,38	—	0,54
0,86	—	0,69	—	—	1,04
3,13	—	4,20	—	—	4,88
—	4 680	—	2 699	—	—
—	0,70	—	0,51	—	—
—	0,64	—	0,49	—	—
—	1,07	—	1,12	—	—
—	0,38	—	0,29	—	—
—	3,12	—	4,20	—	—

t/b_1	3,5		—	4,0	
$t \cdot 10^3$ сек.	2,66		2,75	3,04	
$p(t)$	30	30	27	18	18
$\ddot{y}$	656	656	645	618	618
w, *м/сек*	0,935	0,935	0,980	1,163	1,163
y, *мм*	0,835	0,835	0,910	*0,31	*0,31
u, *м/сек*	9,54	9,19	9,20	9,32	9,25
$0{,}08w$	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09
$0{,}15u$	1,43	1,37	1,38	1,40	1,39
$A = w + 0{,}15u$	2,37	2,31	2,36	2,56	2,55
$B = u - 0{,}08w$	9,47	9,12	9,12	9,23	9,16
$\psi = \frac{A}{B}$	0,250	0,253	0,259	0,277	0,278
$-L(t)$	199	199	$\frac{195}{229}$	$\frac{188}{223}$	$\frac{188}{223}$
x, *мм*	22,4	22,3	23,0	25,7	25,7
$kx = 0{,}0775x$	1,74	1,73	1,78	1,99	1,99
$8{,}00 + kx$	9,74	9,73	9,78	9,99	9,99
$-\psi L$	50,0	50,4	59,2	62,0	62,0
Σ_1	59,7	60,1	69,0	72,0	72,0
S, *см²*	3,82	3,82	3,82	3,82	3,82
$P = p(t)S$	115	115	103	68,8	68,8
$P - \Sigma_1$	55,3	54,9	34,0	—3,2	—3,2
M	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851
$\ddot{x} = \frac{P - \Sigma_1}{M}$	650	645	400	—35	—35
$\Delta t \cdot 10^3$ сек.	0,54	—	0,29	0,29	0,38
1) $\Delta u = \ddot{x}_i \Delta t$	—	—	0,12	—	—0,01
$\Delta x = \left(u_i + \frac{\Delta u}{2}\right)\Delta t$	—	—	2,69	—	3,52
2) $\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_i$	2 564	—	—	365	—
$\Delta u = (\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_1)\frac{\Delta t}{2}$	0,69	—	—	0,05	—
$n = \ddot{x}_i : \ddot{x}_{i-1}$	0,34	—	—	—	—
$\vartheta(n) = \frac{2}{3} \cdot \frac{n+2}{n+1}$	1,17	—	—	1,33	—
$\delta u = \vartheta(n)\frac{\Delta u}{2}$	0,41	—	—	0,03	—
$\Delta x = (u_{i-1} + \delta u)\Delta t$	4,82	—	—	2,68	—

4,5		5,0		5,5	
3,42		3,80		4,18	
11	11	7	7	4	4
576	576	526	526	472	472
1,390	1,390	1,600	1,600	1,790	1,790
*0,80	*0,80	*1,37	*1,37	*2,02	*2,02
9,24	9,17	9,02	8,98	8,75	8,73
0,11	0,11	0,13	0,13	0,14	0,14
1,39	1,38	1,35	1,35	1,31	1,31
2,78	2,77	2,95	2,95	3,10	3,10
9,13	9,06	8,89	8,85	8,61	8,61
0,304	0,306	0,332	0,333	0,360	0,360
177	177	163	163	148	148
213	213	201	201	187	187
29,2	29,2	32,7	32,7	36,1	36,1
2,26	2,26	2,54	2,54	2,80	2,80
10,26	10,26	10,54	10,54	10,80	10,80
64,8	65,0	66,6	67,0	67,3	67,3
75,1	75,3	77,1	77,5	78,1	78,1
3,82	3,82	3,82	3,82	3,82	3,82
42,0	42,0	26,8	26,8	15,3	15,3
—33,1	—33,3	—50,3	—50,7	—62,8	—62,8
0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851
—389	—392	—590	—596	—738	—738
0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
—	—0,15	—	—0,23	—	—0,28
—	3,46	—	3,37	—	3,27
—424	—	—982	—	—1 334	—
—0,08	—	—0,19	—	—0,25	—
11,1	—	1,51	—	1,24	—
0,72	—	0,93	—	0,96	—
—0,03	—	—0,08	—	—0,12	—
3,51	—	3,46	—	3,37	—

t/b_1	6,0		6,5	
$t \cdot 10^3$ сек.	4,56		4,94	
$p\,(t)$	2	2	0	0
$\ddot{y}$	412	412	348	348
w, *м/сек*	1,958	1,958	2,10	2,10
y, *мм*	* 2,73	* 2,73	* 3,50	* 3,50
u, *м/сек*	8,45	8,43	8,11	8,10
$0{,}08w$	0,16	0,16	0,17	0,17
$0{,}15u$	1,27	1,27	1,22	1,22
$A = w + 0{,}15u$	3,23	3,23	3,32	3,32
$B = u - 0{,}08w$	8,29	8,29	7,94	7,94
$\psi = \frac{A}{B}$	0,390	0,390	0,419	0,419
$-L(t)$	132 / 173	132 / 173	114 / 157	114 / 157
x, *мм*	39,4	39,4	42,5	42,5
$kx = 0{,}0775x$	3,05	3,05	3,29	3,29
$8{,}00 + kx$	11,05	11,05	11,29	11,29
$-\psi L$	67,5	67,5	65,6	65,6
Σ_1	78,6	78,6	76,9	76,9
S, *см²*	3,82	3,82	—	—
$P = p(t)S$	7,6	7,6	—	—
$P - \Sigma_1$	−71,0	−71,0	−76,9	−76,9
M	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851
$\ddot{x} = -\frac{P - \Sigma_1}{M}$	−835	−835	−905	−905
$\Delta t \cdot 10^3$ сек.	0,38	0,38	0,38	0,38
1) $\Delta u = \ddot{x}_i\,\Delta t$	—	−0,32	—	−0,34
$\Delta x = \left(u_i + \frac{\Delta u}{2}\right)\Delta t$	—	3,14	—	3,01
2) $\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_i$	−1 573	—	−1 740	—
$\Delta u = (\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_i)\frac{\Delta t}{2}$	−0,30	—	−0,33	—
$n = \ddot{x}_i : \ddot{x}_{i-1}$	1,13	—	1,09	—
$\vartheta\,(u) = \frac{2}{3} \cdot \frac{n+2}{n+1}$	0,98	—	0,99	—
$\delta u = \vartheta(u)\frac{\Delta u}{2}$	−0,15	—	−0,16	—
$\Delta x = (u_{i-1} + \delta u)\Delta t$	3,26	—	3,14	—

7,0		—	7,5		8,0	
5,32		5,17	5,70		6,08	
0	0	0	0	0	0	0
281	281	310	210	210	138	138
2,22	2,22	2,18	2,32	2,32	2,386	2,386
*4,32	* 4,32	* 4,00	* 5,19	*5,19	*6,08	*6,08
7,76	7,76	7,90	7,53	7,56	7,33	7,35
0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19
1,15	1,15	1,19	1,13	1,13	1,10	1,10
3,37	3,37	3,37	3,45	3,45	3,49	3,49
7,58	7,58	7,72	7,34	7,34	7,14	7,14
0,445	0,445	0,436	0,470	0,470	0,490	0,490
96	96	103	77	77	57	57
141	141	110	84	84	64	64
45,5	45,5	44,3	48,4	48,4	51,2	51,2
3,53	3,53	3,43	3,75	3,75	3,97	3,97
11,53	11,53	11,43	11,75	11,75	11,97	11,97
62,7	62,7	48,0	39,5	39,5	31,3	31,3
74,2	74,2	59,4	51,3	51,3	43,3	43,3
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
—74,2	—74,2	—59,4	—51,3	—51,3	—43,3	—43,3
0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851
—872	—872	—698	—602	—602	—510	—510
0,38	—	0,53	0,53	0,38	0,38	0,38
—	—	—0,37	—	—0,23	—	—0,20
—	—	4,10	—	2,83	—	2,76
—1 777	—	—	—1 300	—	—1 112	—
—0,34	—	—	—0,34	—	—0,21	—
—	—	—	0,86	—	0,85	—
1	—	—	1,02	—	1,03	—
—0,17	—	—	—0,17	—	—0,10	—
3,01	—	—	4,10	—	2,84	—

t/b_1	8,5		—	
$t \cdot 10^3$ сек.	6,46		6,77	
$p(t)$	0	0	0	0
$\ddot{y}$	63	63	0	0
w, *м/сек*	2,424	2,424	2,43	2,43
y, *мм*	* 7,00	* 7,00	* 7,75	* 7,75
u, *м/сек*	7,15	7,18	7,06	7,07
$0{,}08w$	0,19	0,19	0,19	0,19
$0{,}15u$	1,07	1,07	1,06	1,06
$A = w + 0{,}15u$	3,49	3,49	3,49	3,49
$B = u - 0{,}08w$	6,96	6,96	6,87	6,87
$\psi = \frac{A}{B}$	0,502	0,502	0,508	0,508
$-L(t)$	$\frac{36}{43}$	$\frac{36}{43}$	$\frac{19}{26}$	$\frac{19}{26}$
x, *мм*	54,0	54,0	56,2	56,2
$kx = 0{,}0775x$	4,19	4,19	4,36	4,36
$8{,}00 + kx$	12,19	12,19	12,36	12,36
$-\psi L$	21,6	21,6	13,2	13,2
Σ_1	33,8	33,8	25,6	26,0
S, *см²*	—	—	—	—
$P = p(t)S$	—	—	—	—
$P - \Sigma_1$	—33,8	—33,8	—25,6	—25,6
M	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851
$\ddot{x} = \frac{P - \Sigma_1}{M}$	—398	—398	—302	—302
$\Delta t \cdot 10^3$ сек.	0,38	0,31	0,31	0,39
1) $\Delta u = \ddot{x}_i \, \Delta t$	—	—0,12	—	—0,12
$\Delta x = \left(u_i + \frac{\Delta u}{2}\right)\Delta t$	—	2,21	—	2,74
2) $\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_i$	—908	—	—700	—
$\Delta u = (\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_i)\frac{\Delta t}{2}$	—0,17	—	—0,11	—
$n = \ddot{x}_i : \ddot{x}_{i-1}$	0,78	—	0,76	—
$\vartheta(n) = \frac{2}{3} \cdot \frac{n+2}{n+1}$	1,04	—	1,05	—
$\delta u = \vartheta(n)\frac{\Delta u}{2}$	—0,09	—	—0,06	—
$\Delta x = (u_{i-1} + \delta u)\Delta t$	2,76	—	2,21	—

—		—	—		—
7,16		7,16	7,50		8,15
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43
*8,7	9,61	9,61	10,44	10,44	12,01
6,95	6,95	6,95	6,86	6,86	6,69
0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
1,04	1,04	1,04	1,03	1,03	1,00
3,47	3,47	3,47	3,46	3,46	3,43
6,76	6,76	6,76	6,67	6,67	6,50
0,514	0,514	0,514	0,519	0,519	0,528
19/26	19/26	19	19	19	19
58,9	58,9	58,9	61,3	61,3	65,7
4,56	4,56	4,56	4,74	4,74	5,10
12,56	12,56	12,56	12,74	12,74	13,10
13,40	13,40	9,75	9,85	9,85	10,00
26,0	26,0	22,3	22,6	22,6	23,1
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—26,0	—26,0	—22,3	—22,6	—22,6	—23,1
0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851
—306	—306	—262	—266	—266	—272
0,39	0,39	—0,34	—0,34	0,65	0,65
—	—	—0,09	—	—0,17	—
—	—	2,35	—	4,40	—
—608	—	—	—528	—	—538
—0,12	—	—	—0,09	—	—0,17
1	—	—	—	—	—
1	—	—	—	—	—
—0,06	—	—	—	—	—
2,74	—	—	—	—	—

Таблица 2

$t \cdot 10^3$ сек.	8,15	8,60		9,00		9,38		9,76	
$\ddot{y}$	—1373	—	—1518	—	—1533	—	—1500	—	—1430
w, *м/сек*	2,43	—	1,78	—	1,17	—	0,59	—	0
y, *мм*	12,01	—	12,96	—	13,55	—	13,88	—	14
u, *м/сек*	6,69	6,83	6,79	6,84	6,79	6,75	6,71	6,58	6,54
$\operatorname{tg}\theta$	0,364	0,262	0,262	0,171	0,171	0,085	0,085	0	—
$A = \operatorname{tg}\theta - f$	0,214	0,112	0,112	0,021	0,021	—0,065	—0,065	—0,15	—
$B = 1 + 0{,}08\operatorname{tg}\theta$	1,029	1,021	1,021	1,014	1,014	1,005	1,005	1,000	—
$\psi = \frac{A}{B}$	0,208	0,110	0,110	0,021	0,021	—0,061	—0,061	—0,15	—
$\mu_1 \frac{d\operatorname{tg}\theta}{dx} u^2$	218	228	227	228	227	222	220	211	—
R_0	7	7	7	7	7	7	7	7	—
dif	211	221	220	221	220	215	213	204	—
x, *мм*	65,70	68,74	68,74	71,47	71,46	74,03	74,03	75,56	76,6
kx	5,1	5,3	5,3	5,5	5,5	5,7	5,7	6,0	—
$\psi \cdot$ dif	44,0	24,3	24,2	4,6	4,6	—13,1	—13,0	—30,6	—
$8{,}00 + kx$	13,1	13,3	13,3	13,5	13,5	13,7	13,7	14,0	—
Dif	30,9	11,0	10,9	—8,9	—8,9	—26,8	—26,7	—44,6	—
Q_{med}	0	0	0	0	0	0	3	3	—
K	30,9	11,0	10,9	—8,9	—8,9	—26,8	—29,7	—47,6	—
M	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	0,0851	—
$\Delta m = \mu_1 \psi \cdot \operatorname{tg}\theta$	0,0110	0,0042	0,0042	0,0036	0,0036	—0,005	—0,005	0	—
$M + \Delta m$	0,0961	0,0893	0,0893	0,0887	0,0887	0,0846	0,0846	0,0851	—
$\ddot{x}$	321	123	122	—100	—100	—316	—350	—560	—
$\Delta t \cdot 10^3$ сек.	0,45	0,45	0,40	0,40	0,38	0,38	0,38	0,38	—
1) $\Delta u = \ddot{x}\,\Delta t$	0,14	—	0,05	—	—0,04	—	—0,13	—	—
Δx	3,04	—	2,73	—	2,57	—	2,53	—	—
2) $\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_i$	—	444	—	22	—	—416	—	—910	—
Δu	—	0,10	—	0	—	—0,08	—	—0,17	—
n	—	0,38	—	—	—	3,2	—	1,6	—
$\vartheta(n)$	—	1,15	—	—	—	0,82	—	0,92	—
δu	—	0,06	—	0	—	—0,03	—	—0,08	—
Δx	—	3,04	—	2,72	—	2,57	—	2,52	—

ЛИТЕРАТУРА

Федоров В. Г. Эволюция стрелкового оружия, ч. I и II. Воениздат, 1938.

Благонравов А. А., Основания проектирования автоматического оружии, изд. Арт. Акад. РККА, 1934.

Дроздов Н. Ф., Таблицы для решения задач внутренней балистики, 1933.

Серебряков М. Е., Гретен К. К. и Оппоков Г. В., Внутренняя балистика, Оборонгиз, 1939.

Вентцель Д. А., Внутренняя балистика, изд. ВВА РККА. 1939.

Окунев Б. Н., Балистические сборники для решения задач внутренней балистики, Изв. ВМА ВМФ, вып. 5, 1940.

Акад. Чаплыгин С. А., Опыт применения уравнений гидродинамики к вопросу о движении снаряда в канале орудия, т. III, стр. 120—164.

Фок В. А., О движении газов в канале орудия во время выстрела, Бюллетень СНР АНИМИ № 2, 1935.

Бравин Е. Л., О степени динамического действия нагрузки, приложенной к упругой системе, изд. ВВА РККА, 1936.

Его же, Колебания пружины с грузом на конце, изд. ВВА РККА, 1936.

Его же, Анализ формул Ф. Ф. Лендера для коэфициента полезного давления, ВВА РККА, 1937.

Его же, Практические приемы построения диаграмм давлений и скоростей снаряда в функции времени, изд. ВВА РККА, 1936.

Его же, О методах расчета времени на начальном участке движения снаряда, Изв. Арт. Акад. РККА, т. XXIV, 1937.

Его же, Новый метод для вычисления некоторых видов квадратур посредством вспомогательной функции. Изв. ВМА ВМФ, вып. 4, 1940.

Журавский А. М., Об одном приеме приближенного интегрирования дифференциальных уравнений и вычисления квадратур. Изв. Отд. технич. наук Акад. наук СССР. № 4, 1940.

Благонравов А. А., Материальная часть автоматического стрелкового оружия, ч. I и II, Воениздат, 1940.

Ефимов М. Г., Курс артиллерийских снарядов, Оборонгиз, 1939.

Акад. Крылов А. Н., О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих приложения в технических вопросах, изд. Акад. наук, 1913 (глава VIII, «Радиальные колебания полого цилиндра»).

Его же, О продольных колебаниях орудия, Бюллетень НТК УВМС РККА, вып. I, 1928.

Его же, О напряжении, вызываемом в упругой системе динамической нагрузкой, Бюллетень НТК УВМС РККА, вып. IV, 1930.

Тимошенко С. П., Теория колебаний в инженерном деле, Госнаучтехиздат, 1932.

Лойцянский Л. Г. и Лурье А. И., Курс теоретической механики, ч. I и II, 1938.

Кетов Х. Ф. и Колчин Н. И., Теория механизмов и машин, Машгиз, 1939.

Мещерский И. В., Динамика точки переменной массы, СПБ., 1897.

Его же, Уравнения движения точки переменной массы в общем случае, СПБ., 1904.

Бравин Е. Л. Метод редукции, изд. ВВА РККА, 1939.

Его же, Расчеты автоматики и определение темпа стрельбы, изд. ВВА РККА, 1939.

Акад. Крылов А. Н., Лекции о приближенных вычислениях, изд. АН СССР, 1933.

Скарборо Дж., Численные методы математического анализа, 1934.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Обозначения и определения 3
Введение 5

Глава I

ПОЛУЧЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

§ 1. Постановка задачи внутренней балистики 20
§ 2. Формулы, вытекающие из чисто механических зависимостей . . . 24
§ 3. Решение задачи пиродинамики по способу проф. Н. Ф. Дроздова . 29
§ 4. Движение снаряда в канале орудия после окончания горения порохового заряда. Температура пороховых газов. Таблицы АНИИ изд. 1933 г. 35
§ 5. Перестроение диаграмм от аргумента пути к аргументу времени. Формулы квадратур Эйлера и проф. Е. Л. Бравина 39
§ 6. Выбор наивыгоднейшего балистического решения 46
§ 7. Метод составления балистических сборников проф. Б. Н. Окунева 52

Глава II

КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

§ 8. Общие основания для классификации 56
§ 9. Первый класс 59
§ 10. Второй класс 66
§ 11. Третий класс 71

Глава III

ПАТРОНЫ

§ 12. Основания устройства пуль, снарядов и патронов 75
§ 13. Внешнее устройство пуль и снарядов 76
§ 14. Ведущие устройства 80
§ 15. О весах пуль и снарядов 87
§ 16. Внутреннее устройство пуль 89
§ 17. Устройство малокалиберных снарядов 99
§ 18. Взрыватели 101
§ 19. Устройство гильз 104
§ 20. Капсюли 108
§ 21. О расчетах снарядов. Обеспечение устойчивости полета пуль и снарядов 111
§ 22. Расчеты динамических характеристик пуль и снарядов 114

Глава IV

РАСЧЕТЫ ПРОЧНОСТИ СТВОЛОВ

§ 23. Теоретические основания для расчета стволов на прочность 121
§ 24. Общие основания устройства и расчета стволов 129

Стр.

Глава V

ДЕТАЛИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

§ 25. Пружины 141
§ 26. Расчет удлинения цилиндрической гильзы 146
§ 27. Затворы автоматического оружия 150
§ 28. Подача 156
§ 29. Влияние условий работы авиационных пулеметов на систему подачи 166
§ 30. Выбрасывающие механизмы 169
§ 31. Ударные механизмы 173
§ 32. Спусковые механизмы 175

Глава VI

ОБЩИЕ МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ ДИФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ АВТОМАТИКИ

§ 33. Основания для составления уравнений движения 178
§ 34. Метод редукции масс и моментов инерции 181
§ 35. Законы трения. Применение метода редукции к некоторым задачам автоматики 189
§ 36. Общие дифференциальные уравнения движения точки переменной массы в форме, данной проф. И. В. Мещерским 193
§ 37. Применение теории удара к расчетам автоматического оружия . 198

Глава VII

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ СИСТЕМ ЗАПИРАНИЯ

§ 38. Системы со свободным затвором 206
§ 39. Системы с несвободным затвором 212
§ 40. Расчет действия автоматики пушки «Эрликон» 216

Глава VIII

НОРМАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ТЕМПА СТРЕЛЬБЫ

§ 41. Постановка задачи 226
§ 42. Геометрические и динамические характеристики механизма автоматики 234
§ 43. Движение штока автоматики до встречи с гребнем 239
§ 44. Закон движения зубчатки 243
§ 45. Движение штока автоматики от начала поворота зубчатки до открывания затвора 246
§ 46. Включение в действие подавателя, отражение гильзы и удар в буфера 248
§ 47. Возвратное движение штока автоматики 254
§ 48. Движение штока на последнем участке 256

Приложения

1. Таблица коэфициентов N_a для расчета производной давления $p(t_y)$ в момент форсирования 261
2. Пример на численное интегрирование системы уравнений пародинамики по способу проф. Е. Л. Бравина 262
3. Таблицы вариаций модуля 273
4. Расчет динамических характеристик фигурных частей снаряда по формулам квадратур Эйлера и проф. Е. Л. Бравина 281
5. Таблицы численного интегрирования уравнений движения частей автоматики 291
Литература 301

Редактор Е. А. ФЕДОРОВА

Подписано к печати 16.4.41. Г512
Объем 19 печ. л., 19,6 авт. л.

В печ. л. 48000 тип. зн. Зак. 729

1-я тип. Управления Воениздата НКО
имени С. К. Тимошенко
Москва, ул. Скворцова-Степанова, д. 3.